FONDS DE RECHERCHES FORESTIÈRES DE L'UNIVERSITÉ LAVAL
LAVAL UNIVERSITY FOREST RESEARCH FOUNDATION

Contribution nº 9

ÉTUDE *IN VITRO* SUR LA MINÉRALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE DANS LES HUMUS FORESTIERS

I. INFLUENCE DE LITIÈRES FORESTIÈRES

par

BERNARD BERNIER et MARCIEN R. ROBERGE

UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC, CANADA
1962

ÉTUDE *IN VITRO* SUR LA MINÉRALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE DANS LES HUMUS FORESTIERS

I. INFLUENCE DE LITIÈRES FORESTIÈRES

par

BERNARD BERNIER [1] et MARCIEN R. ROBERGE [2]

INTRODUCTION

L'azote est l'élément du sol dont la plante a le plus grand besoin pour l'élaboration de ses tissus. Assimilé presque exclusivement sous forme inorganique, ammoniacale ou nitrique, il est pourtant apporté au sol par les litières sous forme organique et est, comme tel, non disponible. La libération de cet élément lié est donc essentielle à sa remise en circuit et partant à la fertilité du sol.

Nombreux sont les travaux qui ont porté sur la minéralisation de débris végétaux divers, mais ceux de Vizir (1956), de Fenton (1958), de Ivarson et Sowden (1959), de Gilbert et Bocock (1960), de Lossaint (1961) et de Weetman (1962) comptent parmi les rares qui aient apporté des renseignements sur la mobilisation de l'azote de litières forestières.

Il est maintenant admis que le taux de minéralisation de l'azote organique dans le sol est la meilleure expression de la disponibilité de cet élément pour les plantes (Fitts *et al.*, 1953 ; Kresge et Merkle, 1957 ; Eagle et Mathews, 1958 ; Zöttl, 1958). Parmi les méthodes employées pour une telle étude celle qui consiste à incuber des échantillons de sol, additionnés ou non de litières, dans des conditions contrôlées d'aération, de température et d'humidité, est certes la plus fertile en renseignements.

[1] Professeur de pédologie forestière, Faculté de génie forestier, Université Laval, Québec.

[2] Ingénieur forestier, présentement à l'emploi du ministère des Forêts du Canada, Laboratoire de Recherches forestières, Québec.

Elle permet un dosage périodique de l'azote minéralisé et apporte des informations sur l'intensité de l'immobilisation de l'azote minéral formé.

Cette méthode a été mise à profit pour étudier l'influence des facteurs écologiques sur la minéralisation de l'azote du sol. C'est ainsi qu'on a pu analyser les effets de la température (Kaila *et al.*, 1953 ; Sabey *et al.*, 1956 ; Frederick, 1956 ; Zöttl, 1958 ; Schreven, 1958 ; Tyler *et al.*, 1959), de l'humidité et de l'aération (Hallam, 1953 ; Fitts *et al.*, 1955 ; Schreven, 1958 ; Zöttl, 1958) de même que de l'acidité (Kaila *et al.*, 1954 ; Duchaufour, 1954 ; Zöttl, 1960*b*).

Réalisée par cette méthode, la présente étude, d'un caractère exploratoire, a pour but de mesurer l'activité de la minéralisation de l'azote et de la nitrification dans quelques représentants des principaux types d'humus forestiers rencontrés dans la Province de Québec, et d'évaluer l'influence de diverses litières forestières sur ces phénomènes. À cette fin nous avons mesuré périodiquement l'azote ammoniacal et nitrique dans 13 échantillons d'humus réunissant des Mor, des Moder et des Mull, pendant une période de 12 à 20 semaines. En outre, la minéralisation de 17 litières forestières et de protéines pures dans des échantillons d'humus a été étudiée.

L'ensemble des résultats obtenus concourent donc à renseigner sur la facilité avec laquelle certaines litières fournissent de l'azote disponible aux plantes, car c'est là, en définitive, que le problème de l'azote prend une importance capitale.

MATÉRIEL ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Matériel

Les litières :

Les litières qui ont servi dans ce travail ont été échantillonnées au cours d'octobre 1959 et 1960. Elles étaient formées de feuilles d'arbres recueillies immédiatement après leur chute, ou de litière de végétation herbacée et de mousses. Dans le cas des aiguilles du sapin et de l'épinette noire, nous les avons prélevées sur l'arbre (aiguilles de trois ans) étant donné la difficulté d'échantillonnage d'une litière d'aiguilles fraîchement tombées.

Aussitôt après leur cueillette, ces litières ont été séchées à l'air et conservées à température de la chambre en jarres fermées. Elles ont été subséquemment broyées (broyeur Burke, type FHP) à 60 mailles pour les incorporer aux échantillons d'humus dans les expériences d'incubation.

TABLEAU 1

LISTE DES LITIÈRES FORESTIÈRES UTILISÉES DANS LES EXPÉRIENCES DE MINÉRALISATION DE L'AZOTE

LITIÈRES*	GROUPEMENTS VÉGÉTAUX D'OÙ ORIGINENT LES LITIÈRES	N %	C %	C/N
Acer saccharum	Érablière (*Aceretum sacchari fagetosum* †)	0.70	51.8	74.0
Hylocomium proliferum	Sapinière (*Hylocomium-Oxalis* 5 §)	0.90	53.0	58.8
Hypnum crista-castrensis	Pessière (*Calliergon* 6 §)	0.90	52.0	57.7
Sphagnum sp.	Pessière (*Calliergon* 6 §)	0.93	53.7	57.7
Acer spicatum	Sapinière (*Dryopteris-Oxalis* 1 §)	0.99	50.8	51.3
Acer rubrum	Érablière (*Aceretum sacchari fagetosum* †)	1.02	53.3	52.2
Picea mariana	Pessière (*Calliergon* 6 §)	1.03	53.6	52.0
Fagus grandifolia	Érablière (*Aceretum sacchari fagetosum* †)	1.14	51.6	45.3
Betula lutea	Érablière (*Aceretum sacchari fagetosum* †)	1.18	53.0	45.0
Calliergon Schreberi	Pessière (*Calliergon* 6 §)	1.25	51.0	40.8
Cornus canadensis	Sapinière (*Hylocomium-Oxalis* 5 §)	1.38	51.0	37.0
Dryopteris spinulosa	Sapinière (*Dryopteris-Oxalis* 1 §)	1.47	52.1	35.4
Hylocomium proliferum #	Sapinière (*Hylocomium-Oxalis* ‡)	1.50	53.2	35.5
Abies balsamea	Sapinière (*Hylocomium-Oxalis* 5 §)	1.60	54.0	33.7
Betula papyrifera	Sapinière (*Dryopteris-Oxalis* 1 §)	1.82	53.7	29.7
Clintonia borealis	Pessière (*Sphagnum-Rubus* ‡)	2.00	51.1	25.5
Oxalis montana	Sapinière (*Dryopteris-Oxalis* 1 §)	2.28	50.5	22.1
Alnus rugosa var. *americana*	Aulnaie (*Cariceto-Alnetum rugosæ* ‖)	2.75	52.8	19.2
Clintonia borealis #	Pessière (*Sphagnum-Alnus* ‡)	4.28	51.0	11.9

* Indiquées par ordre de rapport C/N décroissant.
† Érablière de Saint-Jean-Chrysostome analogue à celle (variante sèche) qu'a décrite Grandtner (1960).
§ Ces milieux sont ceux-mêmes où les humus ont été échantillonnés (tableau 2).
‡ Parc des Laurentides. Les types forestiers *Sphagnum-Rubus* et *Sphagnum-Alnus* ont été décrits par Bellefeuille (1934) et Linteau (1955).
‖ Grandtner (1960).
Les litières d'*Hylocomium proliferum* et de *Clintonia borealis* apparaissent deux fois dans cette liste. Celles-ci ont été employées seulement pour l'étude de l'influence de leur rapport C/N sur la minéralisation de l'azote dans le Mor 2 (figure 7).

La liste des litières utilisées est présentée au tableau 1. Elles proviennent d'essences forestières importantes ou de végétation herbacée susceptible d'apporter une contribution non négligeable dans la formation des horizons humifères et dans la mise en circuit des éléments nutritifs. Ainsi en est-il des mousses qui jouent un rôle prépondérant dans l'élaboration des humus bruts de la forêt coniférienne. Par ailleurs, ces litières ont une teneur en azote fort variable comme l'indiquent les valeurs du rapport C/N (tableau 1) ; ceci est particulièrement important en vue de l'obtention de renseignements de base sur la minéralisation et l'immobilisation de l'azote dans les humus forestiers.

Les humus :

Les milieux d'origine et quelques caractères chimiques des humus utilisés sont indiqués aux tableaux 2 et 3. Les échantillons, recueillis en octobre 1960, à l'exception du Mor 1 et du Mull 2 recueillis en octobre 1959, ont été placés dans une chambre à circulation d'air forcée, à une température de 5°, avant d'être utilisés. Chaque échantillon a été tamisé à 3mm. et subséquemment homogénéisé pour les incubations. Dans le cas des humus bruts seule la couche H a été utilisée.

Méthodes expérimentales

Incubation des échantillons d'humus :

Les échantillons frais d'humus ont été placés après homogénéisation dans des Erlenmeyer de 125 ml. fermés avec des tampons de ouate. Dix g. d'humus (rapportés au poids sec, 105°) ont été utilisés pour les Mull, et 5 g. pour les Moder et les Mor. Les quantités de litières incorporées aux humus apportaient, à moins d'indication contraire, une quantité d'azote de 1,000 ppm d'humus. Les flacons ont été gardés en chambre à cultures, munie d'un dispositif à circulation d'air, à une température de $20 \pm 2°$ pendant 12 ou 20 semaines. Au total, 1,340 flacons ont ainsi été incubés. L'humidité a été maintenue à $140 \pm 20\%$ de la capacité de rétention d'eau en ajoutant périodiquement de l'eau distillée dans les flacons ; c'est à cette teneur optimum d'humidité que le métabolisme des humus est le mieux favorisé (Bernier, 1960).

Extraction et dosage de l'azote minéral :

La quantité de flacons d'un même humus, incubé avec ou sans addition d'une litière ou d'un autre substrat organique, était telle que l'in-

TABLEAU 2

MILIEUX D'ORIGINE DES HUMUS UTILISÉS

Groupement végétal		Humus	Type génétique de sol	Provenance
Association	Type de végétation			
Sapinière à *Oxalis*	*Dryopteris-Oxalis* *	Mor 1 ‡	Podzol humo-ferrugineux	Forêt expérimentale de Montmorency #
		Mor 2 ‡	Podzol humo-ferrugineux	Forêt expérimentale de Montmorency
		Mor 3	Podzol humo-ferrugineux	Forêt expérimentale de Montmorency
	Hylocomium-Oxalis *	Mor 4	Podzol humique hydromorphe	Forêt expérimentale de Montmorency
		Mor 5	Podzol humique hydromorphe	Parc des Laurentides
Pessière à *Hypnum*	*Calliergon* *	Mor 6	Podzol humo-ferrugineux à alios	Parc des Laurentides
		Mor 7	Podzol humo-ferrugineux à alios	Parc des Laurentides
Pessière à Cladonie	*Cladonia-Ledum* *	Mor 8	Podzol humo-ferrugineux à alios	Parc des Laurentides
Érablière laurentienne	A §	Moder 1	Sol brun acide à Moder	Saint-Achille de Montmorency
	B §	Moder 2	Sol brun podzolique	Saint-Achille de Montmorency
	C §	Mull 1	Sol brun forestier	Tewkesbury
	D §	Mull 2 ‖	Sol brun forestier	Sainte-Foy
		Mull 3 ‖	Sol brun forestier	Sainte-Foy

* Groupements végétaux décrits par Linteau (1955) et Lafond (1958).
§ Relevé de végétation donné en appendice.
‡ Échantillons provenant du même milieu mais prélevés à un an d'intervalle.
‖ *Idem.*
Jurdant (1962).

TABLEAU 3

QUELQUES CARACTÈRES CHIMIQUES DES HUMUS UTILISÉS*

HUMUS	ÉCHANTILLON	pH	M.O. %	N total %	C/N	Capacité de rétention d'eau †
Mor	1 § (*Dryopteris-Oxalis*)	4.3	83.6	2.28	20.4	282
	2 «	4.0	86.9	2.14	22.6	287
	3 «	3.1	81.4	2.00	22.6	275
	4 (*Hylocomium-Oxalis*)	3.7	84.4	1.75	26.8	310
	5 «	3.0	89.8	1.83	27.3	300
	6 (*Calliergon*)	3.1	91.1	1.74	29.1	285
	7 «	3.3	94.3	1.19	44.0	294
	8 (*Cladonia-Ledum*)	4.0	78.8	1.79	24.4	234
Moder	1	4.9	43.7	1.40	18.1	144
	2	3.7	34.3	1.20	15.8	117
Mull	1 §	5.1	23.0	0.70	18.3	84
	2	4.8	19.6	0.62	17.6	55
	3	4.8	19.0	0.55	19.3	49

* Analyses effectuées avant la mise en incubation.
† % d'eau retenue (en fonction du poids sec d'humus, 105°) à pF 2.7 (500 *g*).
§ Analyses faites après incubation à 5° pendant 4 mois.

cubation a pu se poursuivre durant 12 ou 20 semaines tout en prélevant, toutes les deux semaines, un flacon appartenant à chaque série d'expérience. C'est ainsi qu'on a pu doser l'azote minéral à intervalle donné. À cette fin, les flacons prélevés pour l'analyse ont été additionnés de 50 ml. d'une solution de K_2SO_4 (N) acidifiée à pH 1.5 avec H_2SO_4 (2N) (Bremner et Shaw, 1955) et agités mécaniquement pendant 30 minutes. La suspension a ensuite été filtrée sur papier et le résidu lavé par des additions répétées de l'agent d'extraction jusqu'à ce que le filtrat soit porté à 100 ml.

Les déterminations de l'azote minéral ont été faites sur une aliquote de cet extrait (5 ml. en général). L'azote ammoniacal a été récupéré par distillation en présence de 1 ml. de NaOH (40%) dans un distillateur micro-Kjeldahl (type Markham), recueilli dans l'acide borique (0.25%) contenant l'indicateur de Ma et Zuazaga (1942) et dosé par titration avec H_2SO_4 (0.01N). L'alliage de Devarda (0.2 g.) a été

ensuite ajouté à cette même aliquote pour réduire les nitrates et la distillation poursuivie de la même façon.

Toutes les déterminations ont été faites au moins en duplicata et les chiffres consignés dans ce texte représentent une moyenne de résultats dont l'écart est inférieur à 5%.

Sans ignorer que la soude, plus que Mg0, favorise la libération de l'ammoniac lié organiquement qui peut exister dans les extraits, nous l'avons utilisée au cours de la distillation, puisqu'elle entraîne moins de moussage après addition de l'alliage de Devarda. Ce moussage est d'ailleurs difficile à éliminer complètement ; il entraîne parfois des traces de soude dans le distillat, rendant la titration hasardeuse. Il a donc fallu doser colorimétriquement (spectrophotomètre Coleman, modèle 14), au moyen du réactif de Nessler (Jackson, 1958), l'ammoniac produit par réduction des nitrates. Cette dernière méthode a d'ailleurs été utilisée chaque fois que la quantité d'ammoniac était faible.

L'addition de l'alliage de Devarda réduit aussi les nitrites en ammoniac mais nous ne les avons pas dosés indépendamment des nitrates, étant donné que les conditions d'incubation n'étaient pas favorables à leur accumulation (Alexander, 1961).

Au cours d'expériences préliminaires, des quantités variables d'azote minéral, soit sous forme ammoniacale, soit sous forme nitrique, ont été ajoutées à un Mor et à un Mull, puis extraites et dosées. Ces essais, utilisant l'agent d'extraction et la méthode de dosage de l'azote minéral précités, ont établi que la récupération de l'azote ammoniacal et de l'azote nitrique était d'au moins 90%.

Autres méthodes utilisées pour l'analyse des échantillons :

Réaction des humus. Le pH des humus a été déterminé au moyen d'un potentiomètre Beckman (modèle H2) muni d'électrodes de verre et de calomel, sur des échantillons conservés humides, et additionnés d'eau de façon à réaliser une suspension épaisse.

Matière organique. La teneur en matière organique des échantillons préalablement séchés à 105° (poids constant), a été déterminée par incinération à 500°. La teneur en carbone organique a été obtenu en divisant le pourcentage de matière organique par 1.80 (Lunt, 1931).

Azote total. L'azote total a été dosé par la méthode Kjeldahl (Cole et Parks, 1946) en utilisant l'indicateur de Ma et Zuazaga (1942).

Capacité de rétention d'eau. La capacité de rétention d'eau des échantillons d'humus a été mesurée par centrifugation à 500 *g* (pF : 2.7) pendant 15 minutes dans une atmosphère saturée d'humidité.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Observations générales relatives à la minéralisation de l'azote et à la nitrification dans les humus *per se* (sans addition de litière) :

Le présent travail réunit les résultats de recherche sur l'activité ammonifiante et nitrifiante dans des humus forestiers très différents par leur origine et leurs propriétés, et placés dans des conditions contrôlées de température, d'humidité et d'aération. Il est certain, comme l'ont montré Duchaufour (1953) ainsi que Jolivet et Hélias (1953), que les conditions très favorables de l'étuve stimulent la minéralisation de l'azote organique des humus, les formes les plus acides se trouvant particulièrement favorisées. Les résultats obtenus dans ces conditions traduisent donc surtout la minéralisation potentielle de la matière organique de ces humus.

On remarque (tableau 4) que les quantités d'azote minéralisé (minéralisation nette) représentent de 5 à 10% de l'azote total de l'humus après 20 semaines d'incubation à 20°. On ne peut d'ailleurs établir avec certitude l'origine de l'azote minéral dosé. Même si l'on accepte que la majorité provient des ions ammonium dans la solution du sol ou adsorbés sur les colloïdes, il faut admettre qu'une faible partie peut originer de l'ammoniac fixé aux argiles ou lié organiquement qui est solubilisé par le réactif d'extraction (Jansson, 1958, p. 134) et subséquemment libéré au cours de la distillation. On sait notamment que certains pigments de la fraction fulvique sont facilement désaminés par hydrolyse acide ou alcaline (Stevenson 1960).

Le nombre restreint d'échantillons d'humus que nous avons analysés ne nous permet pas d'établir des relations précises entre l'azote minéral produit et l'une quelconque des propriétés suivantes des humus : azote total, rapport C/N, acidité, etc. Notons cependant une minéralisation nettement plus active de l'azote dans les humus du groupement végétal *Dryopteris-Oxalis* (Mor 2 et 3) que dans ceux de l'*Hylocomium-Oxalis* (Mor 4 et 5). On sait que l'activité microbienne globale des premiers, réflétée par des analyses respiratoires, est supérieure à celle des derniers (Bernier, 1960) ; nous avons pu d'ailleurs le vérifier avec les échantillons mêmes utilisés dans ce travail. Il convient de rappeler ici que la productivité des peuplements de sapin est supérieure dans les groupements à *Dryopteris* (Linteau, 1955). Des observations analogues ont été faites par Zöttl (1960*a*) qui trouve une certaine dépendance entre la productivité des peuplements de pin et l'azote minéralisé dans l'humus.

Tableau 4

Humus	Échantillon	NH_4-N (ppm)			NO_3-N (ppm)			pH			N total %			C/N		
		(*a*)	(*b*)	(*c*)	(*a*)	(*b*)	(*c*)	(*a*)	(*b*)	(*c*)	(*a*)	(*b*)	(*c*)	(*a*)	(*b*)	(*c*)
Mor	2 (*Dryopteris-Oxalis*)	53	157	1,588	14	8	152	4.0	4.5	4.8	2.14	2.21	2.33	22.6	21.6	20.0
	3 «	81	210	2,044	4	8	12	3.1	3.4	4.2	2.00	2.13	2.46	22.6	20.8	17.6
	4 (*Hylocomium-Oxalis*)	34	146	1,098	8	12	60	3.7	3.9	4.4	1.75	1.85	1.98	26.8	25.0	23.2
	5 «	30	45	1,272	8	4	48	3.0	3.2	3.7	1.83	1.90	2.04	27.3	25.7	23.8
	6 (*Calliergon*)	34	78	918	8	4	28	3.1	3.4	3.6	1.74	1.77	1.83	29.1	28.8	27.2
	7 «	19	17	140	14	4	12	3.3	3.1	2.8	1.19	1.26	1.44	44.0	41.4	37.3
		42	106	1,120	16	4	180	4.0	4.0	3.7	1.79	1.76	1.82	24.4	23.6	23.2
Moder	1	92	164	240	28	60	1,000	4.9	5.2	4.0	1.40	1.43	1.50	18.1	17.4	16.3
	2	68	180	640	80	96	360	3.7	4.1	3.8	1.20	1.20	1.19	15.8	16.1	15.4
Mull	1	24	32	70	18	70	480	5.1	4.8	4.2	0.70	0.66	0.68	18.3	19.8	18.1
	3	24	20	70	30	36	470	4.8	4.7	4.0	0.55	0.64	0.62	19.3	14.8	15.0

VARIATION DE L'ACIDITÉ, DE LA TENEUR EN AZOTE ET DU RAPPORT C/N DES HUMUS APRÈS LA PÉRIODE D'INCUBATION À 5 ET 20°

(*a*) avant incubation.
(*b*) après 20 semaines d'incubation à 5°.
(*c*) après 20 semaines d'incubation à 20°.

Seul, parmi les humus étudiés, le Mor 7 (du groupement végétal *Calliergon*) a eu une très faible production nette d'azote minéral au cours des 20 semaines d'incubation, conséquence sans doute de son rapport C/N élevé (44).

Des changements appréciables se produisent dans certaines propriétés chimiques des humus, après quelques semaines d'incubation, qui sont largement attribuables aux conditions de l'expérience, particulièrement à l'absence de libre drainage dans les flacons, favorisant l'accumulation *in situ* des produits de la minéralisation. On observe notamment (tableau 4), en plus d'une augmentation de l'azote minéral (importante même à 5°), une augmentation de l'azote total et une diminution du rapport C/N, conséquence de l'évolution du gaz carbonique au cours de la minéralisation de la matière organique. Aussi bien observe-t-on des modifications importantes dans l'acidité de l'humus. En effet, le pH augmente avec l'accumulation de l'azote ammoniacal et décroît par suite d'une augmentation de l'azote nitrique. Ce phénomène, déjà remarqué par Zöttl (1960*b*), a aussi été observé avec les échantillons additionnés de litières.

Il semble bien que le déclenchement de la nitrification observé chez certains humus bruts (e.g. Mor 2), après 18 semaines d'incubation à l'étuve, soit attribuable à une remontée du pH, causée par l'accumulation d'ions ammonium. Il convient de noter à ce sujet que l'accumulation d'ammonium permettant de déclencher la nitrification doit être d'autant moins considérable que le pH initial de l'humus brut est plus élevé. C'est là sans doute l'explication de l'absence de nitrates dans le Mor 1 qui renferme pourtant, à la fin de la période d'incubation, une teneur en $N\text{-}NH_4^+$ de 2,836 ppm d'humus comparé à 1,950 ppm chez le Mor 2. Que l'acidité soit l'un des facteurs contrôlant la nitrification dans les humus bruts, cela est aussi démontré par les résultats obtenus après adjonction de carbonate de calcium à un Mor (figure 1). La minéralisation nette de l'azote est activée par une remontée du pH, mais c'est surtout la nitrification qui est favorisée.

La nitrification a débuté après 8 à 10 semaines d'incubation dans les Moder, alors qu'elle était active dès le début dans les Mull, l'ammoniac ne s'accumulant pas dans l'humus. Les quantités d'azote minéralisé, dosé à 2 semaines d'intervalle, sont consignées aux tableaux 5 et 6.

Des mélanges d'échantillons d'humus (figure 2) nous ont permis de constater que l'addition d'un humus brut (5 g.) à un Mull (10 g.) n'affecte à peu près en rien la nitrification. En effet, la production d'azote nitrique est sensiblement la même dans le Mull et dans le mélange d'humus.

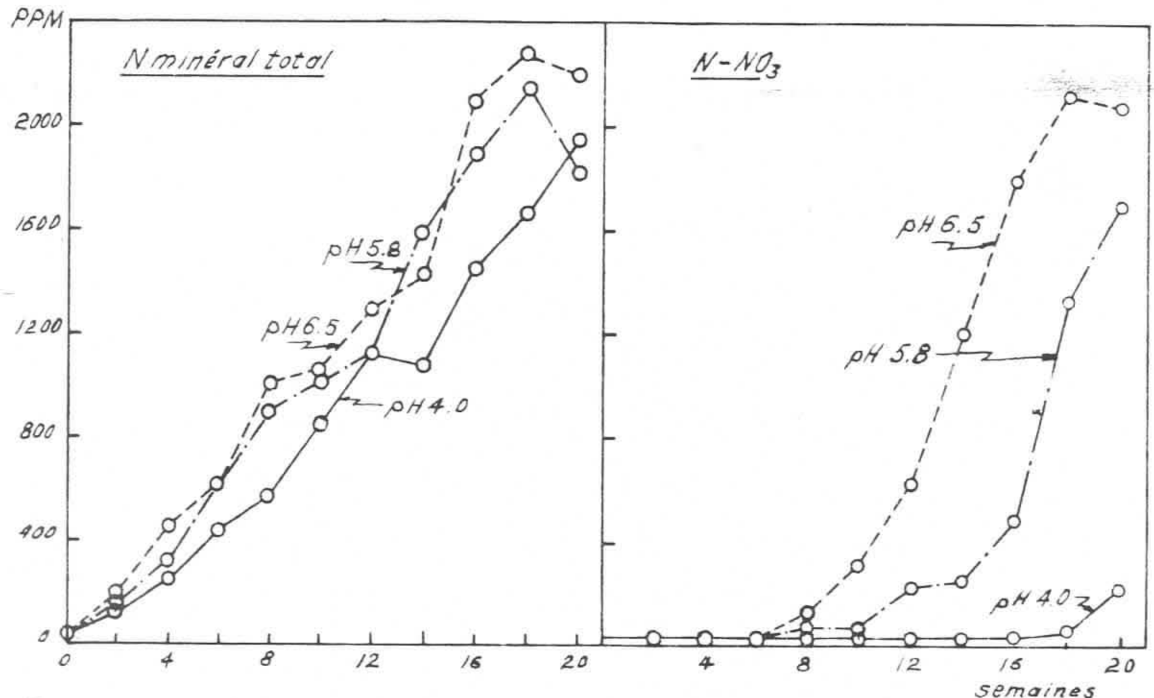


FIGURE 1. — Influence du pH (adjonction de Ca CO_3) sur la production d'azote minéral dans le Mor 2 additionné d'une litière d'*Hylocomium proliferum*.

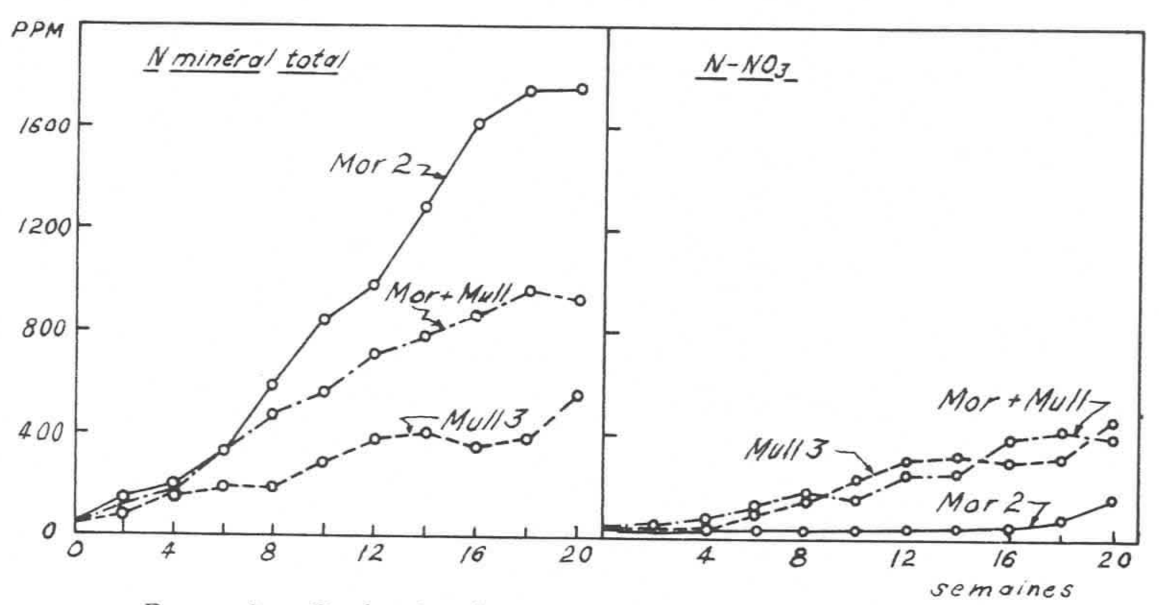


FIGURE 2. — Production d'azote minéral dans un mélange d'humus.

Dans le but de nous renseigner davantage sur le pouvoir nitrifiant des humus, nous les avons additionnés de sulfate d'ammonium (N : 500 ppm d'humus), substance couramment utilisée pour évaluer l'ac-

Tableau 5

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LES HUMUS BRUTS INCUBÉS À 20°

Échantillon		Durée de l'incubation (semaines)										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1* (*Dryopteris-Oxalis*)	NO_3-N	14	14	22	42	19	27	32				
	NH_4-N	427	606	797	950	1708	1557	1725				
	total	**441**	**620**	**819**	**992**	**1727**	**1584**	**1757**				
2 «	NO_3-N	14	14	12	12	18	18	24	36	60	88	152
	NH_4-N	53	95	185	319	563	829	963	1260	1546	1652	1588
	total	**67**	**109**	**197**	**331**	**581**	**847**	**987**	**1296**	**1606**	**1740**	**1740**
3 «	NO_3-N	4	19	12	12	8	8	24	28	20	20	12
	NH_4-N	81	176	312	484	697	854	1109	1310	1933	1786	2044
	total	**85**	**195**	**324**	**496**	**705**	**862**	**1133**	**1338**	**1953**	**1806**	**2056**
4 (*Hylocomium-Oxalis*)	NO_3-N	8	14	12	12	18	18	22	36	32	20	60
	NH_4-N	34	39	120	196	311	473	622	874	1081	1103	1098
	total	**42**	**53**	**132**	**208**	**329**	**491**	**644**	**910**	**1113**	**1123**	**1158**
5 «	NO_3-N	8	14	12	8	12	18	18	24	20	24	48
	NH_4-N	30	45	104	182	277	344	496	717	918	1014	1072
	total	**38**	**59**	**116**	**190**	**289**	**362**	**514**	**741**	**938**	**1038**	**1120**
6 (*Calliergon*)	NO_3-N	8	14	12	12	18	12	18	24	20	24	28
	NH_4-N	34	64	84	235	196	258	367	459	532	622	918
	total	**42**	**78**	**96**	**247**	**214**	**270**	**385**	**483**	**552**	**646**	**946**
7 «	NO_3-N	14	8	8	4	4	8	8	16	8	8	12
	NH_4-N	19	20	11	25	62	50	48	28	11	67	140
	total	**33**	**28**	**19**	**29**	**66**	**58**	**56**	**44**	**19**	**75**	**152**
8 (*Cladonia-Ledum*)	NO_3-N	16	14	51	72	110	112	126	204	152	164	181
	NH_4-N	42	50	115	207	347	470	619	857	963	1316	1120
	total	**58**	**64**	**166**	**279**	**457**	**582**	**745**	**1061**	**1115**	**1480**	**1300**

* Cet échantillon d'humus, recueilli en 1959, a été conservé 4 mois à 5° avant incubation à 20° ; la quantité d'azote minéral au début de l'incubation est donc supérieure à celle des autres échantillons.

TABLEAU 6

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LES MODER ET LES MULL INCUBÉS À 20°

HUMUS	ÉCHANTILLON		DURÉE DE L'INCUBATION (semaines)										
			0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Moder	1	NO_3-N	28	48	96	90	180	400	780	860	900	1040	1000
		NH_4-N	92	144	244	240	392	420	420	476	196	80	240
		total	**120**	**192**	**340**	**330**	**572**	**820**	**1200**	**1336**	**1096**	**1120**	**1240**
	2	NO_3-N	80	144	184	180	210	330	390	340	300	450	360
		NH_4-N	68	114	252	360	462	602	644	684	640	700	740
		total	**148**	**258**	**436**	**540**	**672**	**932**	**1034**	**1024**	**940**	**1150**	**1100**
Mull	1	NO_3-N	18	32	32	55	65	115	230	160	365	480	480
		NH_4-N	24	51	57	55	80	135	140	133	75	130	70
		total	**42**	**83**	**89**	**110**	**145**	**250**	**370**	**293**	**440**	**610**	**550**
	2 *	NO_3-N	63	118	200	285	320	380	370				
		NH_4-N	32	30	12	5	4	30	50				
		total	**95**	**148**	**212**	**290**	**324**	**410**	**420**				
	3	NO_3-N	30	52	90	120	140	230	300	310	300	350	470
		NH_4-N	24	72	55	62	50	60	90	90	56	70	70
		total	**54**	**124**	**145**	**182**	**190**	**290**	**390**	**400**	**356**	**420**	**540**

* Cet échantillon d'humus, recueilli en 1959, a été conservé 4 mois à 5° avant incubation à 20° ; la quantité d'azote minéral au début de l'incubation est donc supérieure à celle des autres échantillons.

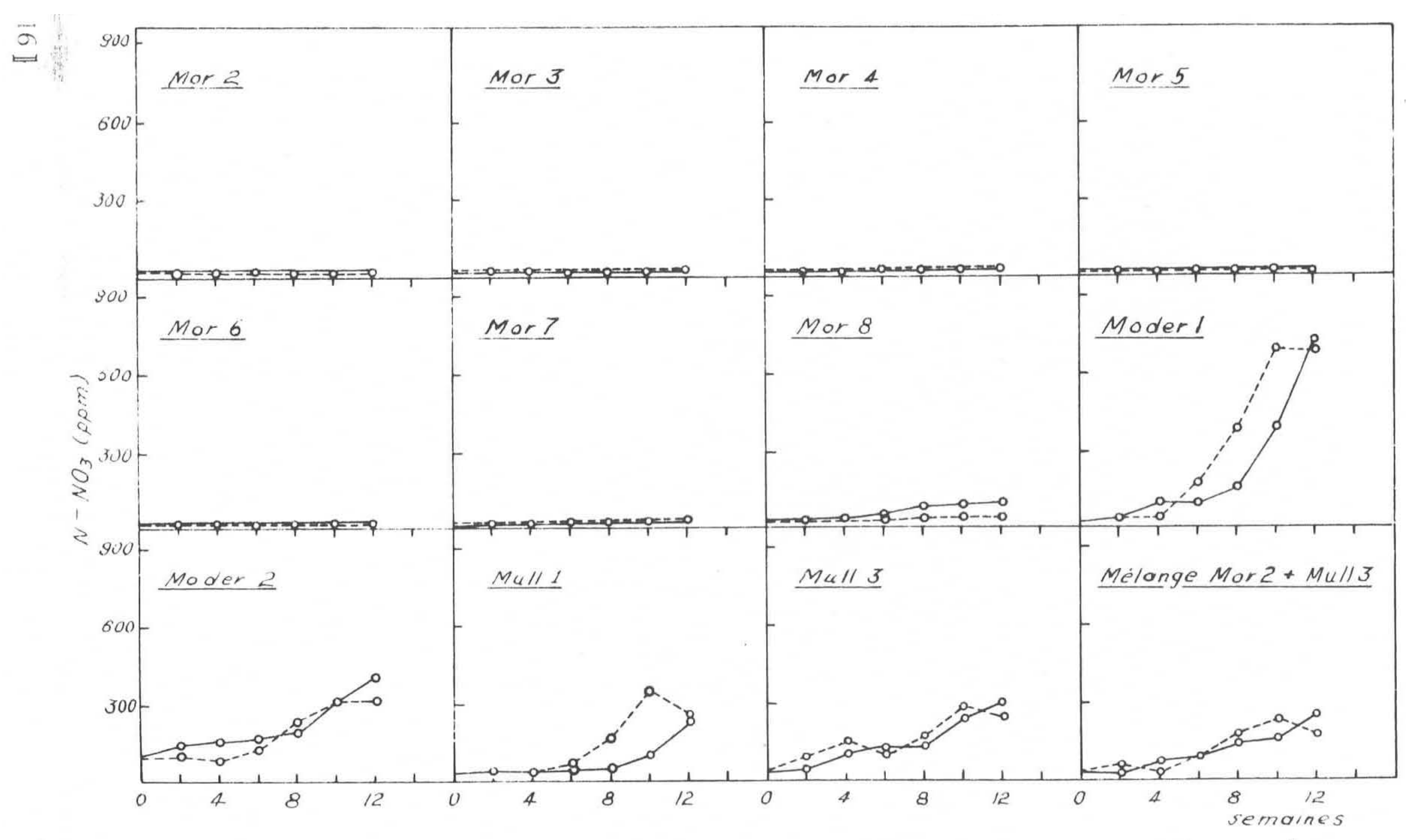


FIGURE 3. — Nitrification dans les humus additionnés de sulfate d'ammonium (N : 500 ppm d'humus). Humus seul———— ; avec $(NH_4)_2 SO_4$ - - - - - .

tivité de la microflore nitrifiante des sols. L'azote ammoniacal ainsi fourni est en partie immobilisé par la microflore et en partie nitrifié.

L'immobilisation initiale a été si importante qu'après deux semaines d'incubation nous ne retrouvions que de 0 à 20% de l'azote minéral ajouté ; même après 12 semaines on n'en retrouvait guère plus de 25%. D'autre part la production d'azote nitrique est restée nulle dans les Mor, alors qu'elle était légèrement supérieure aux témoins dans les Moder et les Mull (figure 3).

Il ne nous semble pas que l'addition de sulfate d'ammonium constitue un moyen idéal d'appréciation de l'activité nitrifiante d'un humus à cause de ses propriétés acidifiantes.

L'ensemble de ces résultats concourent à indiquer que si les bactéries nitrifiantes ne sont pas absentes des humus bruts, elles y sont normalement inopérantes.

2. Effet de la quantité de litière sur la minéralisation nette de l'azote dans deux humus :

Avant d'aborder l'étude de la minéralisation de l'azote des litières dans divers types d'humus (p. 20 et suiv.), nous avons voulu vérifier l'influence de la quantité de litière ajoutée aux humus sur la minéralisation nette de l'azote organique. Nous avons, à cette fin, utilisé deux humus (Mor 1 et Mull 2) auxquels deux quantités de mêmes litières ont été ajoutées (d'une part 250 mg. de litière correspondant à 5 et 2.5% du poids du Mor et du Mull respectivement, d'autre part, une quantité de litière apportant à l'humus 5 ou 10 mg. d'azote, selon le cas, correspondant à 1,000 ppm d'humus).

Nous constatons (figures 4 et 5) que l'addition de chacune des litières, à l'exception de la mousse *Hylocomium proliferum* et à un faible degré de l'*Oxalis montana*, entraîne au départ une immobilisation considérable de l'azote minéral, qui est d'autant plus importante qu'augmente la quantité de litière ajoutée.

Lorsqu'on mesure l'azote minéral dans un humus à la suite de l'addition de litière, on ne mesure ni la minéralisation ni l'immobilisation brutes mais le résultat net de ces deux processus, c'est-à-dire la minéralisation nette ou l'immobilisation nette.

On sait que l'immobilisation de l'azote est la conséquence d'une prolifération de la flore microbienne agissant notamment sur les hydrates de carbone et qui utilise de préférence l'azote minéral du sol, surtout ammoniacal, pour les synthèses protéiques. Il apparaît donc normal qu'une plus grande quantité de litière, ajoutée aux humus, favorise

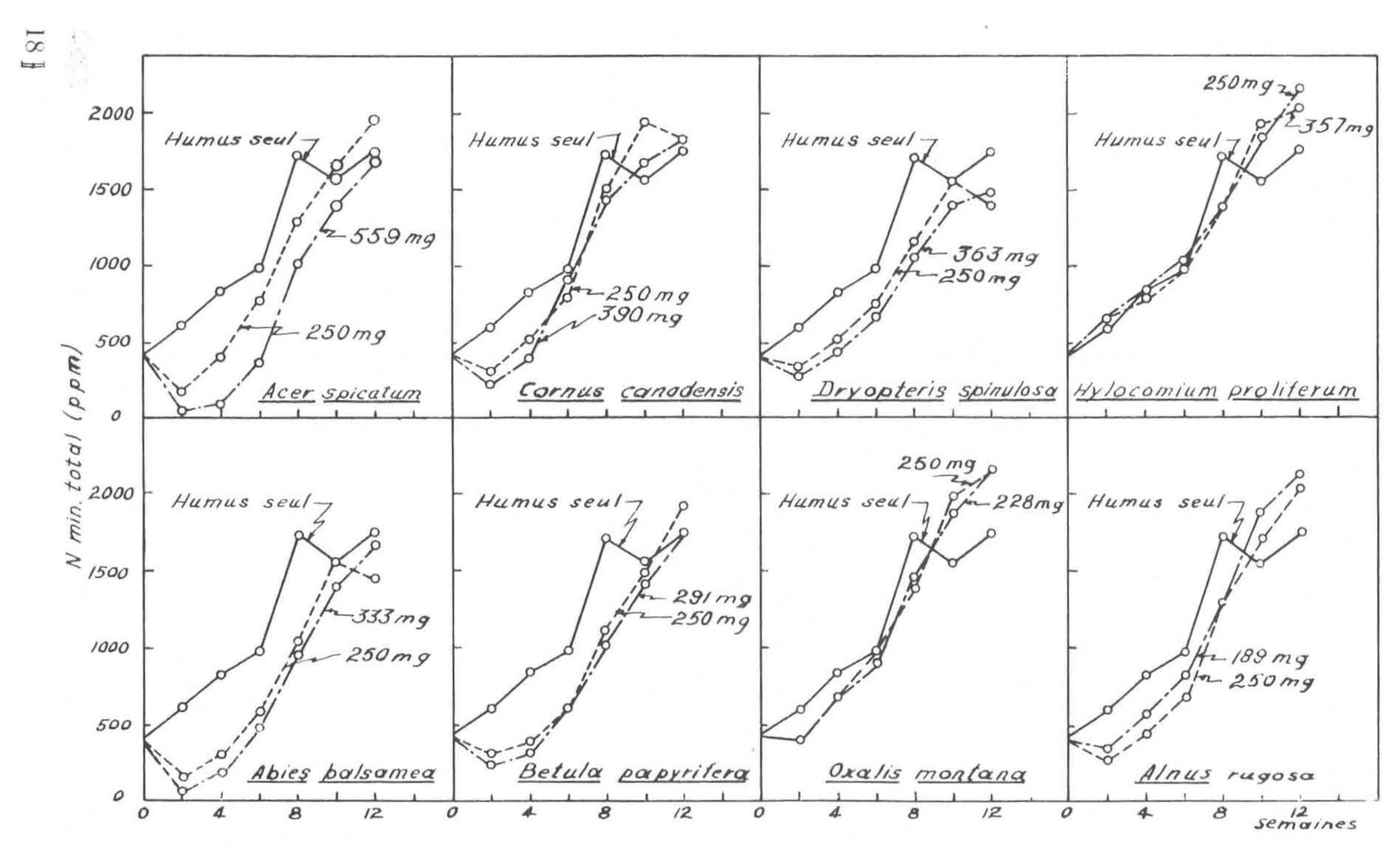


FIGURE 4. — Minéralisation de l'azote dans le Mor 1 additionné de litières à raison de 5% en poids (250 mg) ou d'une quantité correspondant à 5 mg d'azote (1,000 ppm d'humus).

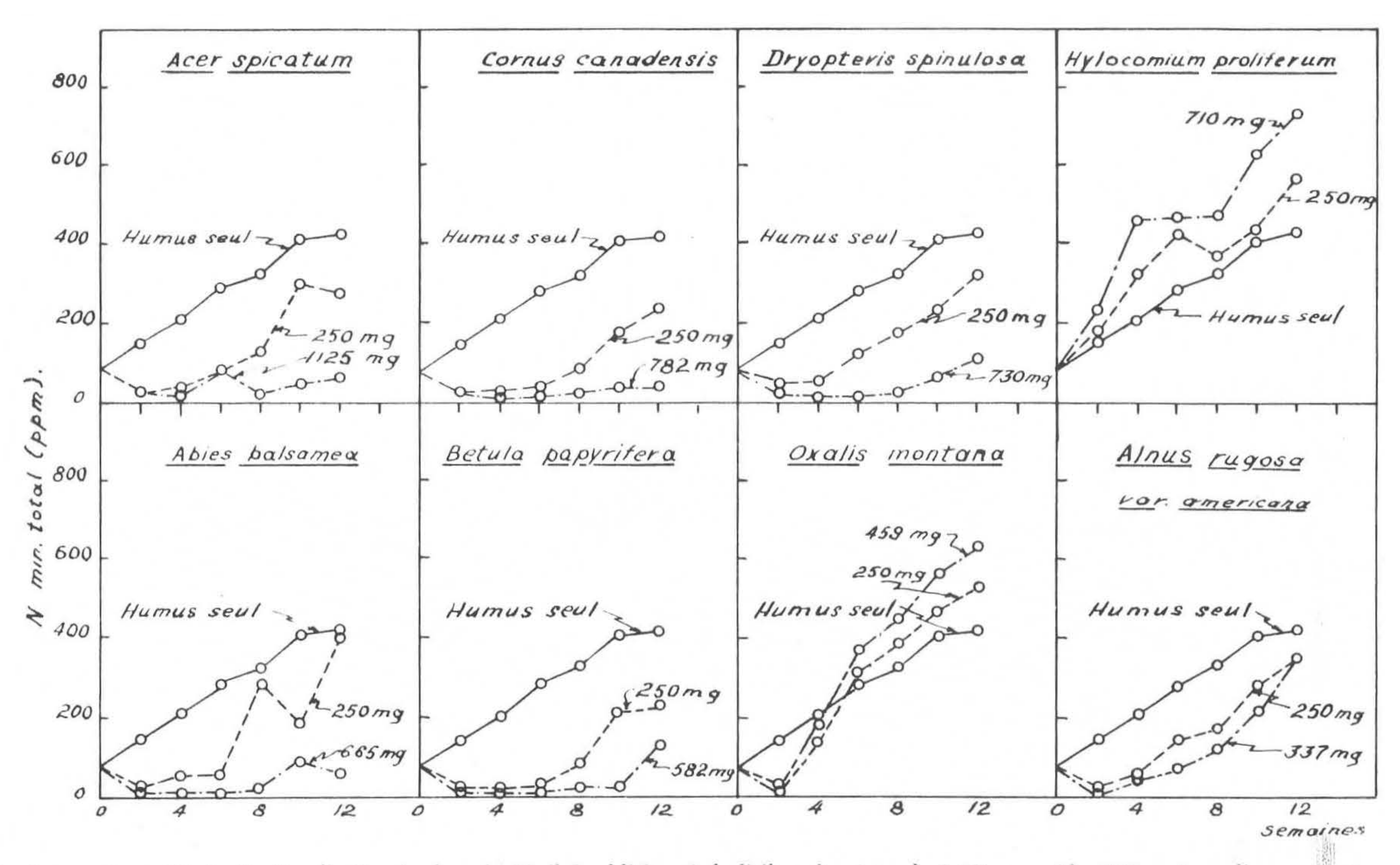


FIGURE 5. — Minéralisation de l'azote dans le Mull 2 additionné de litières à raison de 2.5% en poids (250 mg) ou d'une quanti[illegible] correspondant à 10 mg d'azote (1,000 ppm d'humus).

davantage l'assimilation par les organismes hétérotrophes de l'azote minéralisé. On obtient des résultats semblables après adjonction de cellulose aux humus (figure 6). Si, à cause de la nature particulière de certaines litières, l'immobilisation initiale de l'azote est très restreinte ou n'a pas lieu (e.g. *Oxalis montana* et *Hylocomium proliferum*, particulièrement chez le Mull), on observe au contraire une production d'azote minéral plus forte là où une quantité plus grande de litière est incorporée à l'humus.

L'examen des résultats présentés dans les figures 4 et 5 indique que pour des mesures comparatives la production d'azote minéral par les humus additionnés de diverses litières peut être aussi bien appréciée avec un poids donné de litière qu'avec un poids variable (selon les litières), mais apportant une même quantité d'azote.

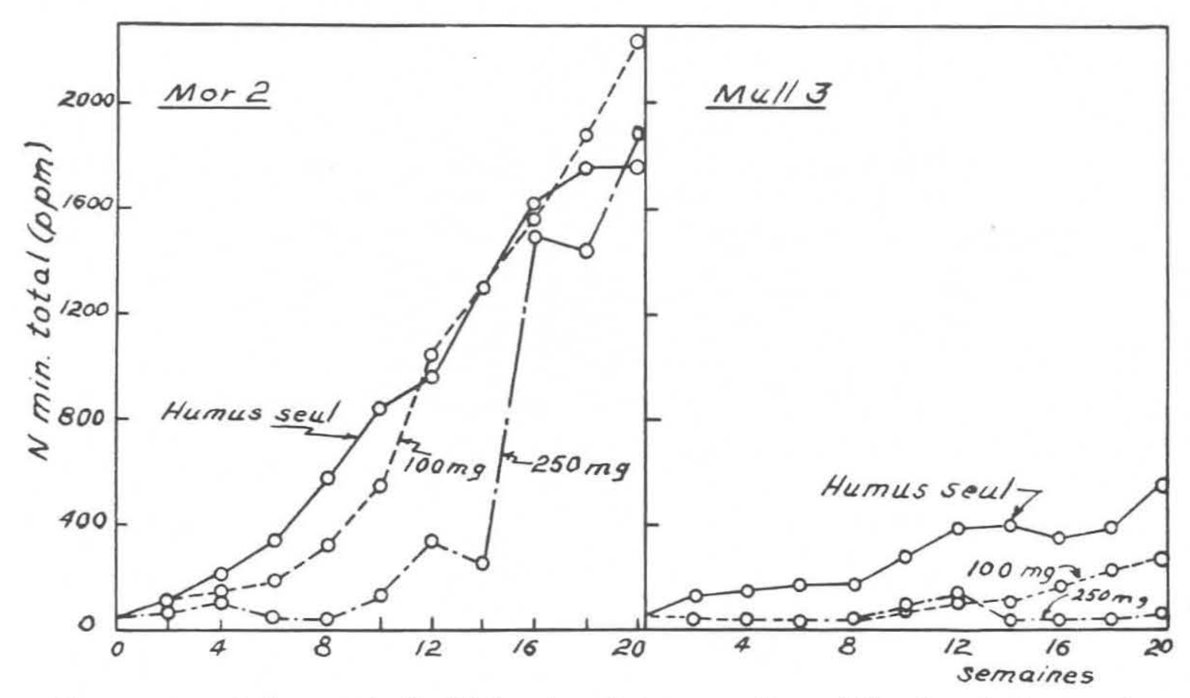


FIGURE 6. — Influence de l'addition de cellulose sur l'immobilisation de l'azote dans deux humus.

3. Production d'azote minéral dans quelques humus additionnés de diverses litières forestières : influence du rapport C/N et de la nature des composés azotés :

Nous présentons ici les résultats d'une étude exploratoire permettant de comparer la minéralisation nette de l'azote organique de diverses litières ajoutées à des échantillons des trois formes principales d'humus, soit le Mor, le Moder et le Mull. Les dix-sept litières analysées n'ont

pas toutes été incorporées à chacun des humus, comme l'indique le tableau 7. On notera cependant que dix de ces litières ont été ajoutées à au moins un même représentant de chacune des trois formes d'humus.

À la lumière des résultats présentés précédemment, et dans le but d'uniformiser la quantité d'azote ajouté, nous avons, au cours de la présente étude, choisi d'incorporer aux humus une quantité de litière contenant 5 ou 10 mg. d'azote, selon le type d'humus, et correspondant à une teneur de 1,000 ppm d'humus.

TABLEAU 7

LISTE DES LITIÈRES AJOUTÉES AUX HUMUS

Litières	Humus bruts n°					Moder n°	Mull n°	
	1	2	4	6	8	1	2	3
Abies balsamea *	+	+	+	..	..	+	+	..
Acer rubrum	..	..	..	..	..	+	..	..
Acer saccharum	..	..	..	..	..	+	..	+
Acer spicatum *	+	..	..	..	..	+	+	..
Alnus rugosa var. *americana*	+	..	..	..	..	+	+	..
Betula papyrifera *	+	..	..	..	..	+	+	..
Betula lutea	..	..	..	..	..	+	..	..
Calliergon Schreberi	..	+	..	+	+	..	..	..
Clintonia borealis	..	+	..	..	..	..	..	..
Cornus canadensis *	+	..	..	..	..	+	+	..
Dryopteris spinulosa *	+	..	..	..	..	+	+	..
Fagus grandifolia	..	..	..	..	..	+	..	..
Hylocomium proliferum *	+	+	+	..	..	+	+	..
Hypnum crista-castrensis *	..	+	..	..	..	+	..	+
Oxalis montana *	+	+	+	..	..	+	+	..
Picea mariana	..	..	..	+	+	..	..	..
Sphagnum sp. *	..	+	..	..	..	+	..	+

* Ces litières ont été ajoutées à au moins un représentant de chacun des trois types d'humus.

Les résultats de cette étude sont consignés dans les tableaux 8 à 15. Les quantités d'azote minéralisé, dosé de deux semaines en deux semaines, sont indiquées pour une durée d'incubation de 12 ou 20 semaines.

L'examen de ces données révèle au commencement de la décomposition de certaines litières une immobilisation de l'azote minéral, alors

TABLEAU 8

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LE MOR 1* (*DRY.-OX.*) ADDITIONNÉ DE LITIÈRES

LITIÈRES INCORPORÉES À L'HUMUS †		DURÉE DE L'INCUBATION (semaines)						
		0	2	4	6	8	10	12
Aucune	NO_3-N	14	14	22	42	19	27	32
	NH_4-N	427	606	797	950	1708	1557	1725
	total	**441**	**620**	**819**	**992**	**1727**	**1584**	**1757**
Acer spicatum	NO_3-N	12	5	19	19	31	27	39
	NH_4-N	387	30	86	355	1018	1398	1635
	total	**399**	**35**	**105**	**374**	**1049**	**1425**	**1674**
Cornus canadensis	NO_3-N	13	7	19	19	23	47	39
	NH_4-N	398	224	377	875	1450	1634	1801
	total	**411**	**231**	**396**	**894**	**1473**	**1681**	**1840**
Dryopteris spinulosa	NO_3-N	13	8	20	17	27	31	31
	NH_4-N	399	277	439	635	1040	1385	1464
	total	**412**	**285**	**459**	**652**	**1067**	**1416**	**1495**
Hylocomium proliferum	NO_3-N	13	7	20	17	19	31	39
	NH_4-N	400	654	749	1013	1358	1832	2120
	total	**413**	**661**	**769**	**1030**	**1377**	**1863**	**2159**
Abies balsamea	NO_3-N	13	9	13	15	19	31	39
	NH_4-N	401	57	172	478	938	1388	1661
	total	**414**	**66**	**185**	**493**	**957**	**1419**	**1700**
Betula papyrifera	NO_3-N	13	8	17	19	29	47	47
	NH_4-N	404	243	334	591	993	1425	1705
	total	**417**	**251**	**351**	**610**	**1022**	**1472**	**1752**
Oxalis montana	NO_3-N	13	9	21	23	33	35	43
	NH_4-N	409	395	642	902	1413	1835	2125
	total	**422**	**404**	**663**	**925**	**1446**	**1870**	**2168**
Alnus rugosa var. *americana*	NO_3-N	13	9	21	19	31	23	47
	NH_4-N	412	326	548	771	1262	1856	2077
	total	**425**	**335**	**569**	**790**	**1293**	**1879**	**2124**

* Cet échantillon a été conservé humide 4 mois à 5° avant incubation.
† Indiquées par ordre de rapport C/N décroissant.

que la décomposition d'autres litières contribue au contraire à augmenter, dès le départ, la teneur en azote minéral dans l'humus. Il convient d'insister ici sur le fait que l'azote minéral mesuré est le ré-

sultat net de la minéralisation et de l'immobilisation, et que ces deux phénomènes sont opérant tout au long de la période d'incubation même si un mécanisme l'emporte parfois sur l'autre conduisant ainsi à des fluctuations vives dans la production d'azote minéralisé au cours des incubations.

Nous pouvons, en généralisant, suivant l'importance de l'immobilisation nette de l'azote minéral dans les premières semaines de l'incubation, classer nos litières en quatre groupes :

(1) Les mousses *Hylocomium proliferum, Sphagnum* sp., *Calliergon Schreberi* et *Hypnum crista-castrensis.* Ce premier groupe est caractérisé d'une part par une minéralisation nette initiale supérieure à la minéralisation endogène et, d'autre part, par l'accumulation d'azote ammoniacal pendant toute la durée de l'incubation lorsque ces litières sont incorporées au Mull, se comportant ainsi comme des protéines pures, telles la caséine et la gélatine (figure 10). Ces litières ont des rapports C/N s'échelonnant entre 35 et 59.

(2) La décomposition des litières du deuxième groupe, comprenant *Oxalis montana, Clintonia borealis* et *Alnus rugosa* var. *americana* est marquée par une courte phase d'immobilisation de l'azote au début de la période d'incubation suivie d'une minéralisation nette supérieure à celle des humus témoins, comme chez les mousses ; on n'observe ici cependant aucune accumulation d'azote ammoniacal au cours de l'incubation, lorsque ces litières sont incorporées au Mull. Leur rapport C/N varie entre 12 et 25.

(3) Le troisième groupe réunit les litières dont la décomposition s'accompagne d'une immobilisation de l'azote pendant 6, 8 ou 12 semaines, suivant qu'elles sont incorporées à un Mor, à un Moder ou à un Mull. Elles groupent *Cornus canadensis, Dryopteris spinulosa, Abies balsamea et Betula papyrifera.* Le rapport C/N varie ici dans des limites assez restreintes : 30-37.

(4) Enfin parmi les litières que nous avons incorporées aux humus, celles d'*Acer spicatum,* d'*Acer rubrum,* de *Betula lutea,* de *Fagus grandifolia,* de *Picea mariana* et d'*Acer saccharum* favorisent le plus l'immobilisation de l'azote. Le rapport C/N s'échelonne ici entre 45 et 74.

Parmi les facteurs influençant la production d'azote minéral, au cours de la décomposition de la matière organique, la composition même de la litière est certes l'un des plus importants. Certains chercheurs ont en effet souligné l'importance de la quantité, aussi bien que de la facilité de décomposition, des différentes substances non protéiques de la matière

TABLEAU 9

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LE MOR 2 (*DRY.-OX.*) ADDITIONNÉ DE LITIÈRES

LITIÈRES INCORPORÉES À L'HUMUS		DURÉE DE L'INCUBATION (semaines)										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Aucune	NO_3-N	14	14	12	12	18	18	24	36	60	88	152
	NH_4-N	53	95	185	319	563	829	963	1260	1546	1652	1588
	total	**67**	**109**	**197**	**331**	**581**	**847**	**987**	**1296**	**1606**	**1740**	**1740**
Hypnum crista-castrensis	NO_3-N	13	16	16	10	11	11	28	25	20	40	128
	NH_4-N	48	45	128	243	315	465	240	605	1076	689	1624
	total	**61**	**61**	**144**	**253**	**326**	**476**	**268**	**630**	**1096**	**729**	**1752**
Sphagnum sp.	NO_3-N	13	16	17	11	16	16	21	24	20	40	152
	NH_4-N	48	93	245	439	575	855	800	917	1182	1643	1832
	total	**61**	**109**	**262**	**450**	**591**	**871**	**821**	**941**	**1202**	**1683**	**1984**
Calliergon Schreberi	NO_3-N	13	17	17	11	17	17	33	36	40	48	208
	NH_4-N	49	100	260	428	617	757	918	1040	1569	1669	1988
	total	**62**	**117**	**277**	**439**	**634**	**774**	**951**	**1076**	**1609**	**1717**	**2196**
Hylocomium proliferum	NO_3-N	13	22	11	7	7	7	22	20	16	40	208
	NH_4-N	50	106	245	440	578	879	1110	1078	1446	1658	1748
	total	**63**	**128**	**256**	**447**	**585**	**886**	**1132**	**1098**	**1462**	**1698**	**1956**
Abies balsamea	NO_3-N	13	13	17	17	11	7	23	28	24	44	92
	NH_4-N	50	50	44	71	174	428	500	713	1512	1663	1714
	total	**63**	**63**	**61**	**88**	**185**	**435**	**523**	**741**	**1536**	**1707**	**1806**
Clintonia borealis	NO_3-N	13	13	17	17	19	15	25	34	28	56	92
	NH_4-N	50	35	205	400	655	935	1115	1585	1401	1576	1238
	total	**63**	**48**	**222**	**417**	**674**	**950**	**1140**	**1619**	**1429**	**1632**	**1330**
Oxalis montana	NO_3-N	13	17	17	21	21	21	34	28	24	60	140
	NH_4-N	50	56	146	371	535	1069	1346	1288	1697	1820	1892
	total	**63**	**73**	**163**	**392**	**556**	**1090**	**1380**	**1316**	**1721**	**1880**	**2032**

Tableau 10

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LE MOR 4 (*HY.-OX.*) ADDITIONNÉ DE LITIÈRES												
Litières incorporées à l'humus		Durée de l'incubation (semaines)										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Aucune	NO_3-N	8	14	12	12	18	18	22	36	32	20	60
	NH_4-N	34	39	120	196	311	473	622	874	1081	1103	1098
	total	**42**	**53**	**132**	**208**	**329**	**491**	**644**	**910**	**1113**	**1123**	**1158**
Hylocomium proliferum	NO_3-N	8	7	7	11	17	17	24	36	32	28	64
	NH_4-N	31	62	204	325	511	656	835	1146	1148	1316	1332
	total	**39**	**69**	**211**	**336**	**528**	**673**	**859**	**1182**	**1180**	**1344**	**1396**
Abies balsamea	NO_3-N	8	7	7	11	11	11	17	24	20	20	20
	NH_4-N	31	24	21	85	156	312	558	1014	1120	1490	1696
	total	**39**	**31**	**28**	**96**	**167**	**323**	**575**	**1038**	**1140**	**1510**	**1716**
Oxalis montana	NO_3-N	8	17	7	17	17	17	33	48	36	24	40
	NH_4-N	32	40	145	350	607	824	1088	1240	1400	1613	1512
	total	**40**	**57**	**152**	**367**	**624**	**841**	**1121**	**1288**	**1436**	**1637**	**1552**

Tableau 11

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LE MOR 6 (*CALLIERGON*) ADDITIONNÉ DE LITIÈRES												
Litières incorporées à l'humus		Durée de l'incubation (semaines)										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Aucune	NO_3-N	8	14	12	12	18	12	18	24	20	24	28
	NH_4-N	34	64	84	235	196	258	367	459	532	622	918
	total	**42**	**78**	**96**	**247**	**214**	**270**	**385**	**483**	**552**	**646**	**946**
Picea mariana	NO_3-N	8	13	11	3	7	4	11	16	16	20	24
	NH_4-N	30	20	25	23	28	23	61	127	180	386	258
	total	**38**	**33**	**36**	**26**	**35**	**27**	**72**	**143**	**196**	**406**	**282**
Calliergon Schreberi	NO_3-N	8	8	11	11	17	7	15	24	24	28	28
	NH_4-N	31	62	147	228	296	376	520	576	706	851	1020
	total	**39**	**70**	**158**	**239**	**313**	**383**	**535**	**600**	**730**	**879**	**1048**

TABLEAU 12

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LE MOR 8 (*CLA.-LE.*) ADDITIONNÉ DE LITIÈRES												
LITIÈRES INCORPORÉES À L'HUMUS		DURÉE DE L'INCUBATION (semaines)										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Aucune	NO_3-N	16	14	51	72	110	112	126	207	152	164	180
	NH_4-N	42	50	115	207	347	470	619	857	963	1316	1120
	total	**58**	**64**	**166**	**279**	**457**	**582**	**745**	**1064**	**1115**	**1480**	**1300**
Picea mariana	NO_3-N	15	8	4	4	4	37	47	48	72	76	216
	NH_4-N	39	23	10	23	65	736	458	321	606	347	1300
	total	**54**	**31**	**14**	**27**	**69**	**773**	**505**	**369**	**678**	**423**	**1516**
Calliergon Schreberi	NO_3-N	15	13	36	50	96	152	185	164	164	224	248
	NH_4-N	40	103	211	360	558	604	695	950	1210	1092	1164
	total	**55**	**116**	**247**	**410**	**654**	**756**	**880**	**1114**	**1374**	**1316**	**1412**

TABLEAU 13

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LE MULL 3 ADDITIONNÉ DE LITIÈRES												
LITIÈRES INCORPORÉES À L'HUMUS		DURÉE DE L'INCUBATION (semaines)										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Aucune	NO_3-N	30	52	90	120	140	230	300	310	300	320	470
	NH_4-N	24	72	55	62	50	60	90	90	56	70	70
	total	**54**	**124**	**145**	**182**	**190**	**290**	**390**	**400**	**356**	**390**	**540**
Acer saccharum	NO_3-N	27	12	10	7	2	7	16	6	4	14	14
	NH_4-N	20	30	30	24	18	31	35	28	20	24	24
	total	**47**	**42**	**40**	**31**	**20**	**38**	**51**	**34**	**24**	**38**	**38**
Hypnum crista-castrensis	NO_3-N	27	8	17	27	27	120	134	151	100	170	170
	NH_4-N	21	35	33	45	13	54	80	365	308	140	20
	total	**48**	**43**	**50**	**72**	**40**	**174**	**214**	**516**	**408**	**310**	**190**
Sphagnum sp.	NO_3-N	27	41	71	107	90	206	295	360	320	320	470
	NH_4-N	21	57	134	160	116	206	241	238	322	280	230
	total	**48**	**98**	**205**	**267**	**206**	**412**	**536**	**598**	**642**	**600**	**700**

organique fraîche sur la minéralisation de l'azote (Rubins et Bear, 1942 ; Bremner et Shaw, 1957 ; Iritani et Arnold, 1960). Par exemple la lignine, quoique très résistante à l'attaque microbienne (Peevy et

TABLEAU 14

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LE MULL 2* ADDITIONNÉ DE LITIÈRES

LITIÈRES INCORPORÉES À L'HUMUS		DURÉE DE L'INCUBATION (semaines)						
		0	2	4	6	8	10	12
Aucune	NO_3-N	63	118	200	285	320	380	370
	NH_4-N	32	30	12	5	4	30	50
	total	**95**	**148**	**212**	**290**	**324**	**410**	**420**
Acer spicatum	NO_3-N	57	5	19	64	19	33	39
	NH_4-N	28	20	13	9	4	9	19
	total	**85**	**25**	**32**	**73**	**23**	**42**	**58**
Cornus canadensis	NO_3-N	59	4	13	7	7	21	21
	NH_4-N	30	27	3	12	20	23	21
	total	**89**	**31**	**16**	**19**	**27**	**44**	**42**
Dryopteris spinulosa	NO_3-N	59	7	7	13	15	38	85
	NH_4-N	30	24	11	7	19	23	19
	total	**89**	**31**	**18**	**20**	**34**	**61**	**104**
Hylocomium proliferum	NO_3-N	59	133	330	291	338	432	430
	NH_4-N	30	109	128	188	140	197	310
	total	**89**	**242**	**458**	**479**	**478**	**629**	**740**
Abies balsamea	NO_3-N	59	1	7	6	7	70	25
	NH_4-N	30	25	1	9	15	25	31
	total	**89**	**26**	**8**	**15**	**22**	**95**	**56**
Betula papyrifera	NO_3-N	60	1	13	6	9	17	117
	NH_4-N	30	28	9	13	17	19	27
	total	**90**	**29**	**22**	**19**	**26**	**36**	**144**
Oxalis montana	NO_3-N	60	5	158	368	449	555	602
	NH_4-N	30	24	29	5	2	9	38
	total	**90**	**29**	**187**	**373**	**451**	**564**	**640**
Alnus rugosa var. *americana*	NO_3-N	61	6	31	50	112	222	318
	NH_4-N	30	19	17	21	5	9	29
	total	**91**	**25**	**48**	**71**	**117**	**231**	**347**

* Cet échantillon a été conservé humide 4 mois à 5° avant incubation.

Norman, 1948 ; Mikola, 1955), inhibe à peine la minéralisation nette de l'azote alors que la cellulose favorise considérablement son immobilisation (Rubins et Bear, 1942 ; Jensen, 1952 ; Bremner et Shaw, 1957). Comme nous n'avons pas de renseignements précis sur la composition organique de nos litières, en particulier sur la nature des hydrates de carbone, leur importance sur la minéralisation de l'azote n'a pu être analysée.

Il va de soi que la production d'azote minéral est également reliée à la teneur aussi bien qu'à la nature des divers composés azotés de la matière organique fraîche (Owen, Winsor et Long, 1950 ; Jansson, 1958). Harmsen et Schreven (1955) considèrent que seul le matériel ayant un C/N inférieur à 20 ou 25 peut généralement permettre, immédiatement après son addition, une production d'azote minéral supérieure à la production endogène. La substance dont le rapport C/N est plus élevé ne permet initialement qu'une libération de gaz carbonique, l'azote minéralisé étant immédiatement immobilisé.

Rubins et Bear (1942), Bremner et Shaw (1957) ainsi qu'Iritani et Arnold (1960) ont néanmoins trouvé que la pratique de déterminer la valeur d'un matériel comme engrais azoté d'après son rapport C/N n'est pas toujours sûre, et leur remarque est confirmée par les résultats obtenus dans le présent travail. Il convient toutefois de noter que le rapport C/N des litières augmente en passant des groupes 2 à 4, alors qu'augmente l'immobilisation de l'azote minéral.

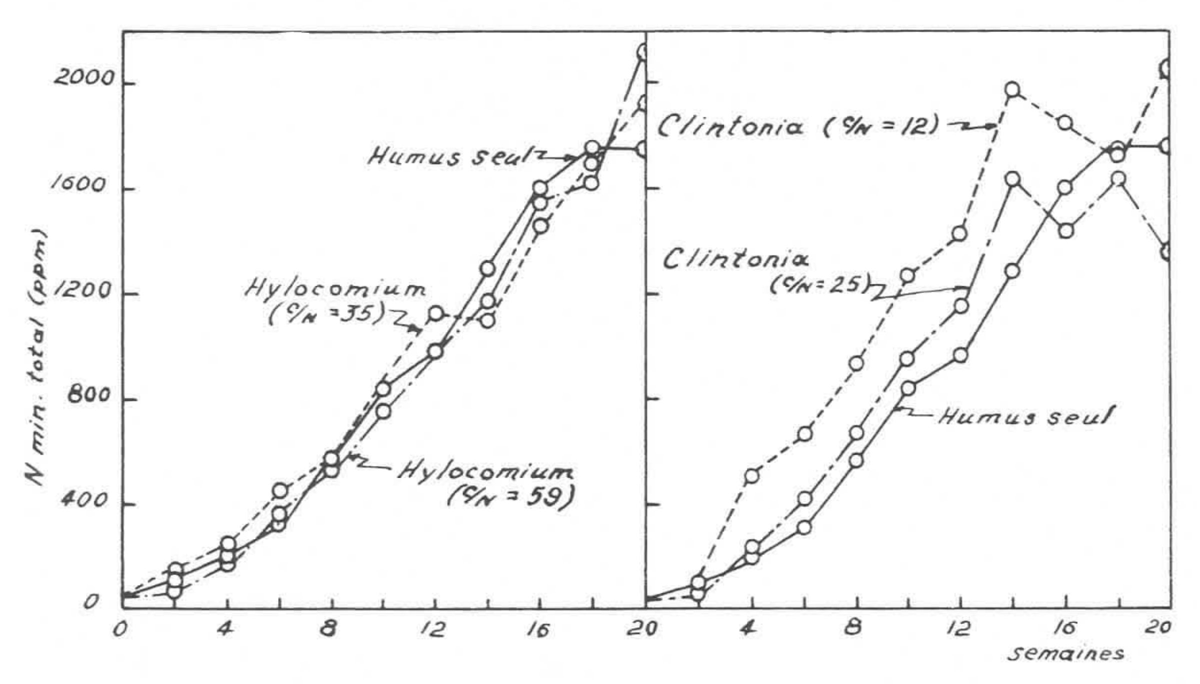


FIGURE 7. — Influence du rapport C/N d'une litière sur la minéralisation de l'azote dans le Mor 2. La quantité de litière ajoutée renferme dans chaque cas 5 mg d'azote (1,000 ppm d'humus).

En vue d'accroître nos renseignements sur la relation liant la production nette d'azote minéral au rapport C/N des litières nous avons incorporé à un humus brut des litières d'une même espèce provenant de stations différentes et ayant des rapports C/N différents. Ainsi deux litières d'*Hylocomium proliferum* (C/N : 35 et 59) et deux litières de *Clintonia borealis* (C/N : 12 et 25) ont été incubées individuellement avec le Mor 2. On note (figure 7) que les litières d'*Hylocomium* ont sensiblement le même taux de minéralisation. Chez les litières de *Clintonia* on observe une courte phase d'immobilisation de l'azote dans un cas, alors que les taux de minéralisation sont par la suite à peu près identiques. Ces résultats soulignent l'importance de la nature des composés azotés, plutôt que l'influence du seul rapport C/N, sur le devenir de l'azote organique des litières.

Signalons enfin les résultats obtenus avec des humus additionnés d'un mélange de deux litières à rapports C/N différents (figure 8). On remarque, dans le cas du mélange de litières *Oxalis-Abies*, un taux de minéralisation intermédiaire à celui des litières incorporées individuellement aux humus. Par contre les différences sont plus difficiles à apprécier dans le cas du mélange *Betula-Abies*.

Il est une donnée essentielle qui se dégage de la présente étude, et sur laquelle il convient d'insister, à savoir que, dans l'ensemble, le comportement des diverses litières essayées en regard de l'équilibre minéralisation-immobilisation semble dépendre davantage des litières mêmes, plutôt que du type d'humus, malgré des différences d'intensité dans ces deux phénomènes d'un humus à un autre à la suite de l'adjonction d'une même litière. En d'autres termes il existe des litières dont la décomposition s'accompagne d'une phase d'immobilisation, quel que soit l'humus auquel elles sont incorporées. Cette observation est illustrée à la figure 9 réunissant des courbes de minéralisation d'un représentant de chacun des trois premiers groupes de litières (*Hylocomium proliferum*, *Oxalis montana* et *Abies balsamea*) lorsqu'elles sont incorporées à 5 humus différents. L'addition d'*Hylocomium* à l'un quelconque de ces humus ne déprime pas sa teneur en azote minéral. Par contre l'immobilisation de l'azote, négligeable dans le cas de la litière d'*Oxalis*, est importante et longue avec la litière de sapin.

La composition de la litière apparaît donc contrôler dans une large mesure la vitesse de minéralisation de l'azote *in vitro*. D'autres facteurs entrent en jeu dans le milieu naturel qui seront discutés plus loin.

Par contre, le phénomène de nitrification apparaît être essentiellement fonction du type d'humus, de son pH, et il va sans dire de la

Tableau 15

PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL (PPM) DANS LE MODER 1 ADDITIONNÉ DE LITIÈRES

Litières incorporées à l'humus		Durée de l'incubation (semaines)										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Aucune	NO_3-N	28	48	96	90	180	400	780	860	900	1040	1000
	NH_4-N	92	144	244	240	392	420	420	476	196	80	240
	total	**120**	**192**	**340**	**330**	**572**	**820**	**1200**	**1336**	**1096**	**1120**	**1240**
Acer saccharum	NO_3-N	25	10	13	7	21	31	80	52	8	148	300
	NH_4-N	76	55	55	48	56	90	130	140	188	248	520
	total	**101**	**65**	**68**	**55**	**77**	**121**	**210**	**192**	**196**	**396**	**820**
Hypnum crista-castrensis	NO_3-N	25	28	21	32	80	172	265	280	970	1010	1160
	NH_4-N	80	58	108	146	230	290	350	420	230	190	140
	total	**105**	**86**	**129**	**178**	**310**	**462**	**615**	**700**	**1200**	**1200**	**1300**
Sphagnum sp.	NO_3-N	25	56	45	45	98	180	410	410	850	1120	1120
	NH_4-N	80	150	225	348	563	613	613	532	430	360	520
	total	**105**	**206**	**270**	**393**	**661**	**793**	**1023**	**942**	**1280**	**1480**	**1640**
Acer spicatum	NO_3-N	25	26	7	15	14	27	117	172	496	450	440
	NH_4-N	82	72	58	50	47	134	300	252	50	100	120
	total	**107**	**98**	**65**	**65**	**61**	**161**	**417**	**424**	**546**	**550**	**560**
Acer rubrum	NO_3-N	26	15	22	22	11	37	65	132	132	240	580
	NH_4-N	82	51	51	51	44	131	122	274	208	232	220
	total	**108**	**66**	**73**	**73**	**55**	**168**	**187**	**406**	**340**	**472**	**800**
Fagus grandifolia	NO_3-N	26	34	7	15	11	27	126	188	380	750	820
	NH_4-N	82	110	51	51	51	84	487	324	90	90	300
	total	**108**	**144**	**58**	**66**	**62**	**111**	**613**	**512**	**470**	**840**	**1120**

TABLEAU 15 (*suite*)

LITIÈRES INCORPORÉES À L'HUMUS		DURÉE DE L'INCUBATION (semaines)										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Betula lutea	NO_3-N	26	25	7	7	7	18	90	144	152	328	320
	NH_4-N	82	51	51	51	40	94	163	284	148	116	200
	total	**108**	**76**	**58**	**58**	**47**	**112**	**253**	**428**	**300**	**444**	**520**
Cornus canadensis	NO_3-N	26	7	15	7	26	80	333	380	520	900	1040
	NH_4-N	87	60	60	60	88	188	170	182	70	90	40
	total	**113**	**67**	**75**	**67**	**114**	**268**	**503**	**562**	**590**	**990**	**1080**
Dryopteris spinulosa	NO_3-N	26	0	15	15	37	70	244	410	770	760	900
	NH_4-N	87	26	60	33	133	228	230	322	98	40	100
	total	**113**	**26**	**75**	**48**	**170**	**298**	**474**	**732**	**868**	**800**	**1000**
Hylocomium proliferum	NO_3-N	26	73	95	102	195	400	760	700	1200	1200	1260
	NH_4-N	86	157	245	360	726	558	246	392	240	600	220
	total	**112**	**230**	**340**	**462**	**921**	**958**	**1006**	**1092**	**1440**	**1800**	**1480**
Abies balsamea	NO_3-N	26	8	14	19	45	75	238	610	680	860	1320
	NH_4-N	87	46	41	68	336	343	286	266	134	40	100
	total	**113**	**54**	**55**	**87**	**381**	**418**	**524**	**876**	**814**	**900**	**1420**
Betula papyrifera	NO_3-N	26	30	23	15	34	102	190	336	690	800	1040
	NH_4-N	86	53	60	53	90	190	160	207	120	200	140
	total	**112**	**83**	**83**	**68**	**124**	**292**	**350**	**543**	**810**	**1000**	**1180**
Oxalis montana	NO_3-N	27	8	35	96	173	375	750	1000	1200	1360	1280
	NH_4-N	88	46	157	448	500	444	225	308	224	140	140
	total	**115**	**54**	**192**	**544**	**673**	**819**	**975**	**1308**	**1424**	**1500**	**1420**
Alnus rugosa var. *americana*	NO_3-N	27	14	25	36	104	150	422	610	850	1080	1390
	NH_4-N	88	46	94	204	295	400	355	294	220	260	640
	total	**115**	**60**	**119**	**239**	**399**	**550**	**777**	**904**	**1070**	**1340**	**2030**

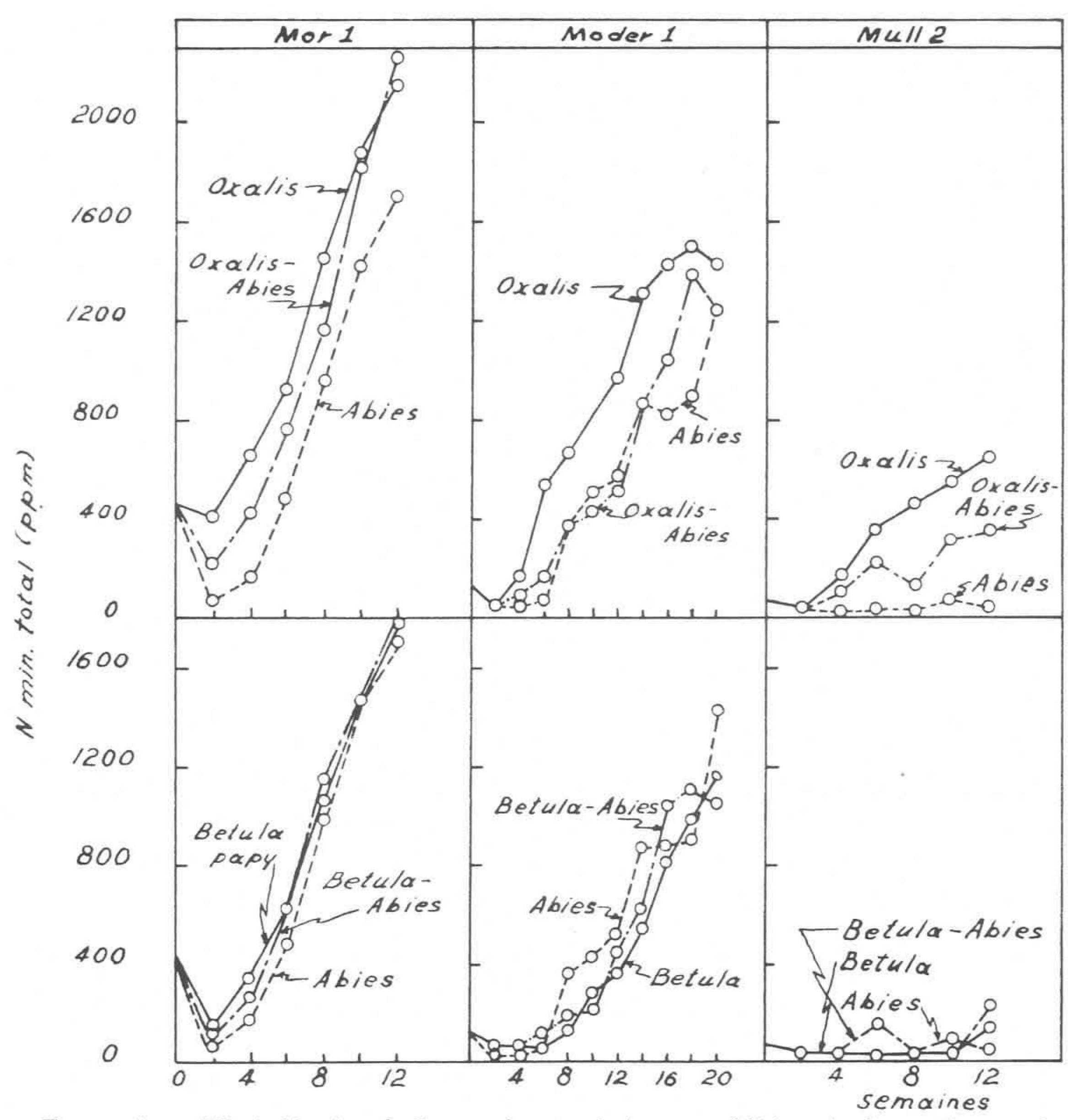


FIGURE 8. — Minéralisation de l'azote dans trois humus additionnés des mélanges de litières *Oxalis-Abies* et *Betuta-Abies*. La quantité d'azote apporté par les litières est de 1,000 ppm d'humus pour les litières ajoutées individuellement et de 500 ppm pour chacune des litières du mélange.

quantité d'azote ammoniacal formé, mais non de la nature des litières. En effet l'addition d'une litière, si facilement minéralisable soit-elle, à un humus sans activité nitrifiante ne déclenche en rien la nitrification. Ainsi en est-il d'ailleurs après adjonction de protéines aux humus (*vide infra*).

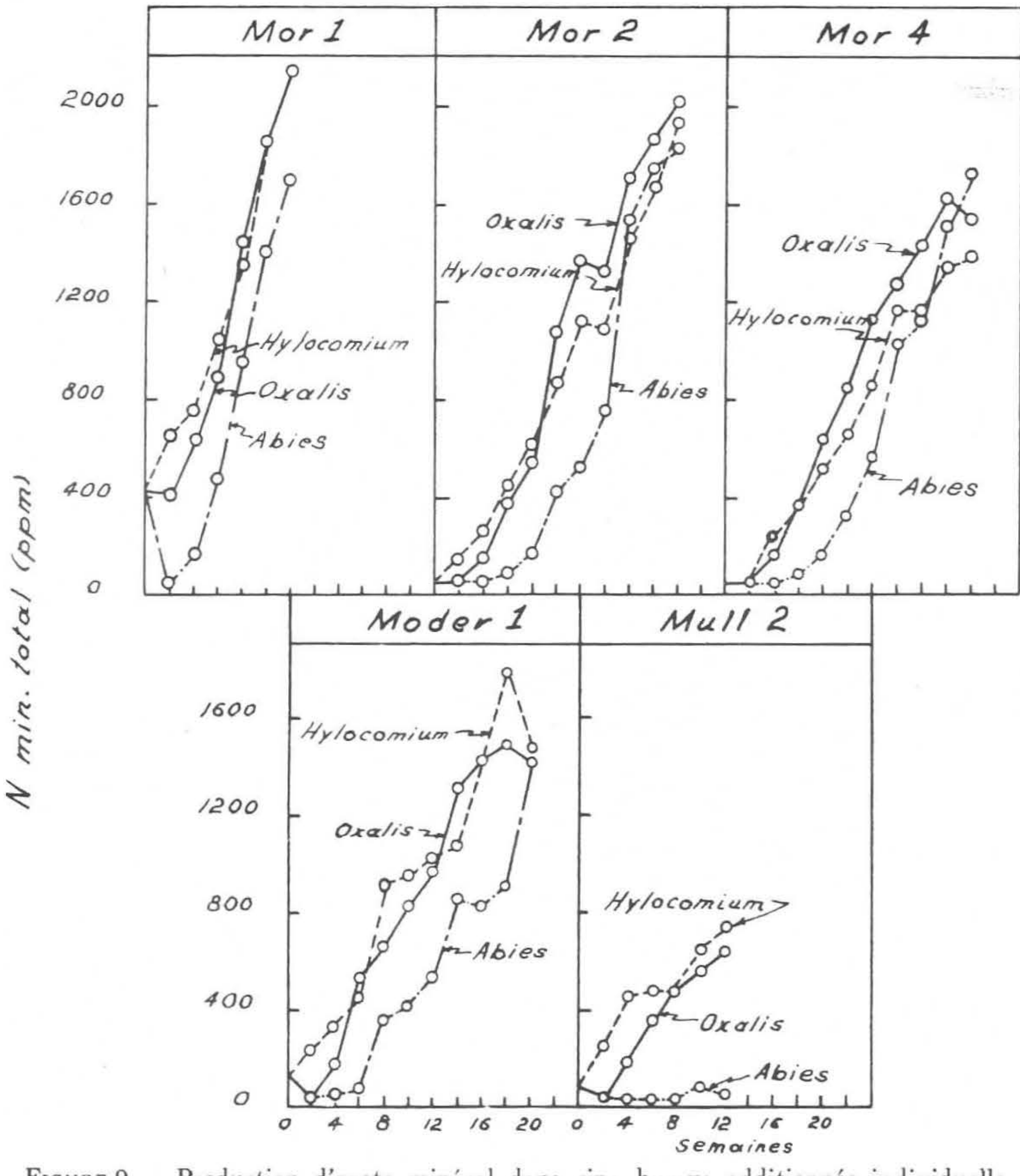


FIGURE 9. — Production d'azote minéral dans cinq humus additionnés individuellement des litières d'*Hylocomium proliferum*, d'*Oxalis montana* et d'*Abies balsamea* (N org. ajouté : 1,000 ppm d'humus).

4. Minéralisation de l'azote de protéines pures dans certains humus et influence des litières de sapin et d'érable à sucre sur la minéralisation de la caséine :

Le taux de minéralisation de l'azote des litières dépend dans une large mesure de leur composition. On sait que les protéines végétales, qui forment dans les litières la source majeure de l'azote apporté aux sols forestiers, peuvent acquérir une forme sous laquelle leur minéralisa-

tion peut être considérablement ralentie, notamment par suite de leur fixation par certains polyphénols (Handley 1954, 1961 ; Love et Brown, 1959 ; Davis *et al.*, 1960). Dans le but de vérifier l'existence possible d'inhibiteurs de la minéralisation de l'azote dans certaines litières, nous avons mesuré la minéralisation de protéines pures dans des humus forestiers additionnés de litières (sapin et érable à sucre) dont le taux de minéralisation est particulièrement faible. Les litières ou les protéines ajoutées apportaient dans chaque cas une quantité d'azote équivalente à 1,000 ppm d'humus.

Lorsque la caséine ou la gélatine sont ajoutées seules aux humus (Moder, Mull et Mor) leur minéralisation est particulièrement rapide (figure 10). Dès la dixième semaine d'incubation 80 – 90% de l'azote protéique apparaît sous forme inorganique. L'azote ammoniacal est la seule forme d'azote minéral dans les humus bruts mais il est en partie nitrifié dans le Moder et le Mull. La minéralisation de la caséine ne provoque pas une remontée du pH de l'humus capable de déclencher hâtivement la nitrification.

Alors qu'il existe très peu d'azote ammoniacal dans le Mull *per se*, on note la présence d'ammoniac tout au long de l'incubation lorsque l'humus est additionné de caséine ou de gélatine, indiquant que le taux de minéralisation de ces protéines est nettement supérieur au taux de nitrification. Après dix semaines d'incubation la quantité d'azote ammoniacal est de l'ordre de 1,000 ppm d'humus et cette valeur demeure sensiblement constante jusqu'à la fin de l'incubation. Parmi les litières dont on a étudié la minéralisation, les seules qui montrent un tel comportement sont les mousses.

En présence de litières de sapin ou d'érable à sucre, la minéralisation nette de la caséine dans les humus est considérablement affectée. On note (figure 11) que le mélange caséine-sapin, ajouté au Mor 2, a une production d'azote minéral intermédiaire à celle de la caséine et de la litière de sapin ajoutées séparément. Ce comportement est semblable à celui du mélange des litières *Oxalis*-sapin étudié antérieurement (figure 8).

L'addition de litière d'érable à sucre au Mull 2 inhibe totalement la minéralisation nette de la caséine (figure 11). Sans doute, comme la cellulose (figure 6), l'addition de cette litière à rapport C/N élevé favorise-t-elle considérablement l'immobilisation de l'azote dans cet humus, même lorsque le pH de l'humus est augmenté par addition de carbonate de calcium (figure 11), mais on explique mal une immobilisation aussi importante en présence de caséine.

On a noté antérieurement que lorsque cette litière est incorporée seule au Moder, la production d'azote minéral débute après 12 semaines

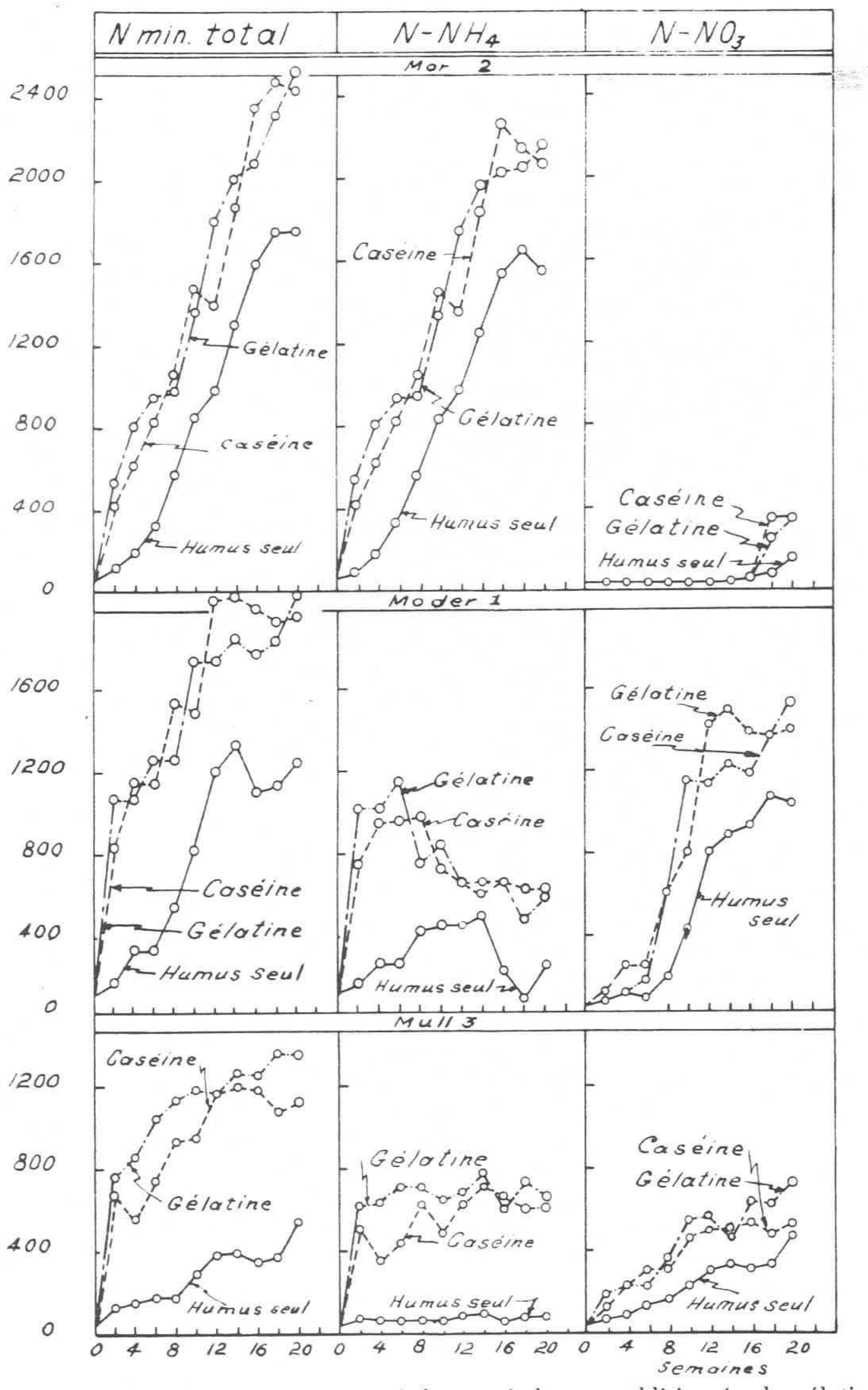


FIGURE 10. — Production d'azote minéral dans trois humus additionnés de gélatine et de caséine (N org. ajouté : 1,000 ppm d'humus).

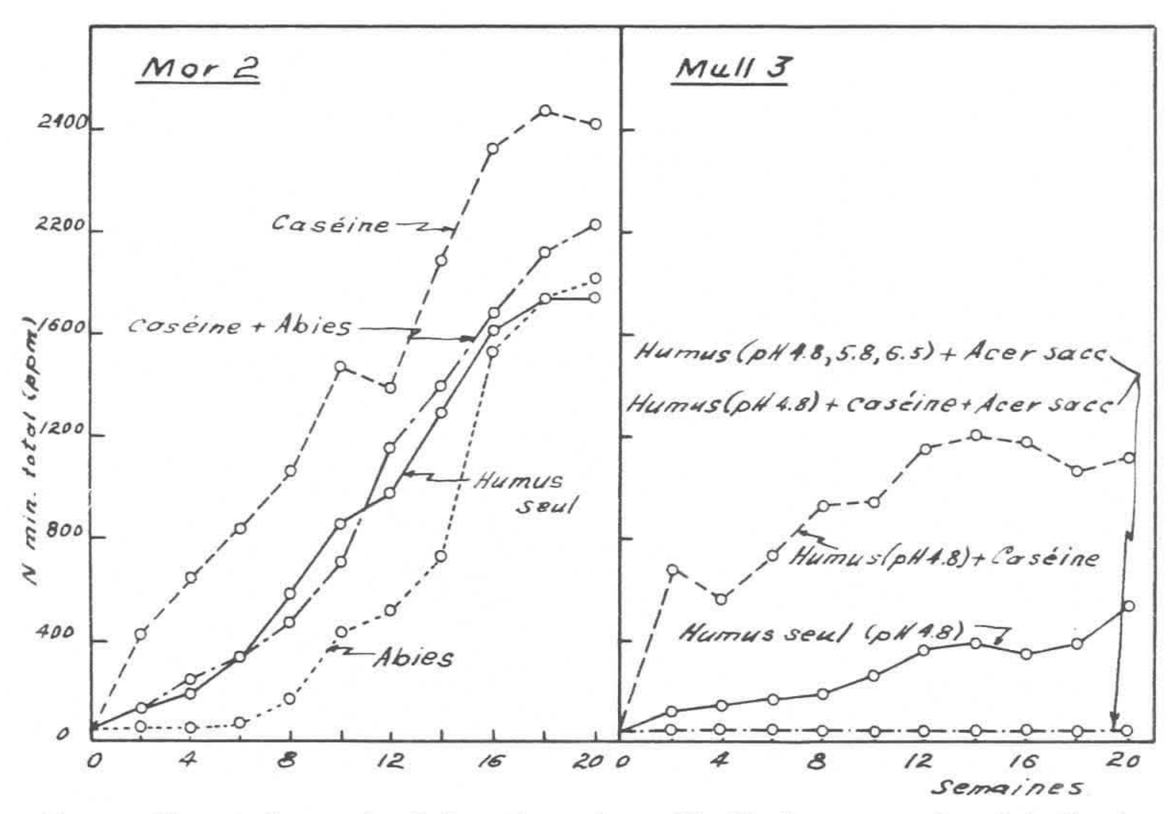


FIGURE 11. — Influence des litières de sapin et d'érable à sucre sur la minéralisation de l'azote de la caséine.

d'incubation (tableau 13) ce qui indiquerait que le phénomène traduit une immobilisation intense plutôt qu'une inhibition proprement dite de la minéralisation. Il n'en reste pas moins possible que si cette litière renferme des agents inhibant la minéralisation des protéines, ceux-ci peuvent être partiellement détruits dans le Moder, indiquant que leur stabilité peut varier d'une forme d'humus à une autre.

Il importe de souligner qu'il s'agit ici d'une litière d'érable à sucre provenant d'une station où l'humus est un Moder acide. Nous entrevoyons difficilement un pareil comportement chez les litières d'érable à sucre originant de stations plus riches (sols bruns à Mull doux ou à Mull calcimorphe).

CONCLUSION

La méthode d'incubation que nous avons employée nous a permis d'obtenir un certain nombre de renseignements de base sur la minéralisation de l'azote de quelques litières forestières et sur la nitrification dans les humus forestiers.

Il est probable, à la lumière des résultats obtenus, et considérant les conditions favorables de l'incubation, que la nitrification n'a pas cours dans la plupart des humus bruts *in situ*, alors qu'elle apparaît être active dans les Mull où les nitrates constituent la principale forme d'azote minéral. Moins active dans les Moder que dans les Mull, la nitrification n'en reste pas moins opérante. L'absence de nitrates dans les humus bruts n'implique pas pour autant une minéralisation ralentie. Elle est au contraire active, notamment dans certains humus de la sapinière à *Oxalis*.

La remise en circuit de l'azote apporté au sol par les litières sous forme organique, et conséquemment non disponible, est une condition essentielle de la fertilité du sol. Contrôlée par l'activité d'une microfaune capable d'incorporer les débris végétaux à la couche humifère, site d'une activité microbienne intense, la minéralisation de l'azote lié organiquement nous apparaît aussi largement dépendante de la composition même des litières et spécialement de la nature aussi bien que la teneur de leurs composés azotés.

Les essences forestières sont souvent classées en espèces plus ou moins améliorantes d'après le rapport C/N des litières qu'elles apportent au sol. On peut se rendre compte, d'après les résultats de cette étude, que le seul rapport C/N, comme critère d'une telle classification, est souvent douteux.

En effet, nous n'avons pu obtenir une corrélation évidente entre le rapport C/N des litières et le taux de minéralisation nette de leur azote. D'une façon générale, un rapport C/N élevé favorise l'immobilisation, du moins temporaire, de l'azote minéralisé. On ne peut cependant généraliser ce comportement puisque la nature des composés azotés et carbonés tout autant que leur teneur respective contrôle l'équilibre minéralisation-immobilisation. La minéralisation rapide de l'azote des mousses, lorsqu'elles sont incorporées à un humus, malgré leur rapport C/N élevé, illustre bien cet énoncé. Si, dans le milieu naturel, notamment dans la pessière et la sapinière, les litières de mousses s'accumulent en une couche fibreuse, il semble que cette accumulation ne

résulte pas tant d'une résistance à la minéralisation que de leur non incorporation à la couche biologiquement active, faute d'une microfaune fouisseuse dans ces milieux. Cette matière organique n'en constitue pas moins une réserve extrêmement précieuse d'azote facilement minéralisable.

Il convient par ailleurs de souligner que le taux de minéralisation de l'azote obtenu pour les diverses litières est comparatif et non absolu. Il est largement conditionné par l'état de division des tissus. Ainsi en est-il, d'ailleurs, de l'immobilisation de l'azote minéral qui est réduite lorsque la litière est simplement appliquée sur la surface du sol (Parker, Larson et Bartholomew, 1957).

Une meilleure connaissance de la composition des litières, de la nature de leurs hydrates de carbone, de l'interaction possible de leurs protéines avec certaines substances diminuant leur susceptibilité à l'attaque enzymatique et, partant, freinant leur minéralisation, faciliterait beaucoup l'interprétation des résultats obtenus. Cela aiderait à comprendre pourquoi certaines litières se minéralisent rapidement et d'autres lentement, sans que ceci soit nécessairement lié à leur rapport C/N ou au type d'humus auquel elles sont incorporées. Aussi bien la portée pratique de ces renseignements n'est pas négligeable car la vitesse de minéralisation de l'azote des litières forestières détermine largement la genèse des formes naturelles d'humus et partant l'évolution du groupement végétal.

RÉSUMÉ

Le présent travail réunit les résultats d'une étude *in vitro* de l'influence de quelques litières forestières sur la minéralisation de l'azote organique dans des représentants des principaux types d'humus forestiers rencontrés dans la Province de Québec.

Dans les conditions d'incubation utilisées, la minéralisation de l'azote est particulièrement rapide dans les humus bruts de la sapinière à *Oxalis*. Active dans les Mull, la nitrification est plus restreinte dans les Moder ; elle apparaît être normalement inexistante dans les humus bruts.

Des dix-sept litières incubées avec les humus, certaines se minéralisent rapidement d'autres favorisent, pour une période plus ou moins longue, l'immobilisation de l'azote minéral. La facilité avec laquelle elles peuvent fournir de l'azote disponible varie donc considérablement selon les espèces. L'équilibre minéralisation-immobilisation semble relativement indépendant des formes d'humus auxquelles les litières sont incorporées. Ce comportement n'est pas non plus lié directement au rapport C/N des litières mais semble dépendre largement de la suscep-

tibilité à l'attaque de leurs composés azotés et de leurs hydrates de carbone. Une litière d'érable à sucre, originant d'un site à Moder acide, paraît même renfermer des substances freinant la minéralisation de l'azote protéique.

SUMMARY

The present work was undertaken to study the influence of some forest litters on the course of nitrogen mineralisation in various types of forest humus. Under the controlled environmental conditions used, nitrogen mineralisation appears especially active in raw humus developped under balsam fir stands of Northern Quebec. Although it is rapid in Mull humus, nitrification is apparently low in Moder and is normally inoperant in raw humus ; it is however markedly enhanced by liming in the last two types of humus.

The seventeen litters incubated with some of the humus vary greatly in their ability tc supply available nitrogen. Some considerably enhance nitrogen immobilisation, regardless of the humus form into which these are incorporated. Such a behaviour is not imputable only to the C/N ratio of the litters but appears to largely depend on the susceptivity to enzymic breakdown of their carbohydrates and nitrogenous constituents. A litter sample originating from a sugar maple stand where an acid Moder has developped, appears to contain substances capable of impeding the mineralisation of protein nitrogen.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil national des Recherches du Canada dont l'aide financière a contribué à la réalisation de ce travail. Ils adressent aussi leur gratitude aux professeurs A. Lafond et M. Grandtner pour leurs suggestions relatives à la nomenclature des groupements végétaux. L'un d'eux (M. R. R.) est grandement redevable aux autorités de la *Canadian International Paper Co.* (Fondation F. K. Morrow) et de la *St. Lawrence Corporation* pour les bourses qu'elles lui ont gracieusement attribuées.

BIBLIOGRAPHIE

Alexander, M. (1961). *Introduction to soil microbiology*. John Wiley and Sons, Inc., New-York, p. 285.

Bellefeuille, R. (1934). La reproduction des peuplements d'épinette noire dans les forêts du Nord-Québec. *Texte des Conf. de l'Assemblée ann. de l'Assoc. Ing. for. Prov. Québec*, 35-59.

Bernier, B. (1960). Observations sur le métabolisme respiratoire de quelques humus forestiers. *Fonds Rech. For. Univ. Laval, Contrib. n° 5.*

Braun-Blanquet, J. (1928). *Pflanzensoziologie*. Springer, Berlin.

Bremner, J. M., et Shaw, K. (1955). Determination of nitrate and ammonia in soil. *J. agric. Sci.*, **46**, 320-328.

Bremner, J. M., et Shaw, K. (1957). The mineralization of some nitrogenous materials in soil. *J. Sci. Food Agric.*, **8**, 341-347.

Cole, J. O., et Parks, C. R. (1946). Semimicro-Kjeldahl procedure for control laboratories. *Anal. Chem.*, **18**, 61-62.

Davis, R. I., Coulson, C. B., et Lewis, D. A. (1960). Polyphenols in soil profile development. *Sci. Proc. Roy. Dublin Soc.*, Series A, **1**, 183-189.

Duchaufour, P. (1953). Humus actif et humus inerte. *Ann. Éc. Nat. Eaux et Forêts*, **13**, 401-453.

Duchaufour, P. (1954). Essai d'ammonification et de nitrification de différents humus forestiers. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 239 (16), 998-999.

Eagle, D. J., et Mathews, B. C. (1958). Measurement of nitrate-supplying power of soils by an incubation method and correlation with crop yield response. *Can. J. Soil Sci.*, **38**, 161-170.

Fenton, R. T. (1958). A laboratory study of nitrogen mobilization during litter decomposition. *Plant and Soil*, **9**, 202-214.

Fitts, J. W., Bartholomew, W. V., et Heidel, H. (1953). Correlation between nitrifiable nitrogen and yield response of corn to nitrogen fertilization on Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **17**, 119-122.

Fitts, J. W., Bartholomew, W. V., et Heidel, H. (1955). Predicting nitrogen fertilizer needs in Iowa soils. I. Evaluation and control of factors in nitrate production and analysis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19**, 69-74.

Frederick, L. R. (1956). The formation of nitrate from ammonium nitrogen in soils. I. Effect of temperature. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **20**, 496-500.

Gilbert, O., et Bocock, K. L. (1960). Changes in leaf litter when placed on the surface of soils with contrasting humus types. II. Changes in the nitrogen content of oak and ash leaf litter. *J. Soil Sci.*, **11**, 10-19.

Grandtner, M. M. (1960). La forêt de Beauséjour, comté de Lévis, Québec. Étude phytosociologique. *Fonds Rech. For. Univ. Laval, Contrib. n° 7.*

Hallam, M. J. (1953). Influence of moisture, aeration and substrate on rates of biological transformations of carbon and nitrogen in soil. *Iowa State College Jour. Sci.*, **27**, 185-186.

HANDLEY, W. R. C. (1954). Mull and mor formation in relation to forest soils. *Forestry Commission Bull. n° 23.*

HANDLEY, W. R. C. (1961). Further evidence for the importance of residual leaf protein complexes in litter decomposition and the supply of nitrogen for plant growth. *Plant and Soil,* **15**, 37-73.

HARMSEN, G. W., et Schreven, D. A. (1955). Mineralization of organic nitrogen in soil. *Advances in Agron.*, **7**, 299-395.

IRITANI, W. M., et ARNOLD, C. Y. (1960). Nitrogen release of vegetable crop residues during incubation as related to the chemical composition. *Soil Sci.*, **89**, 74-82.

IVARSON, K. C., et SOWDEN, F. J. (1959). Decomposition of forest litters. I. Production of ammonia and nitrate nitrogen, changes in microbial population and rate of decomposition. *Plant and Soil,* **11**, 237-248.

JACKSON, M. L. (1958). *Soil Chemical Analysis.* Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., p. 195.

JANSSON, S. L. (1958). Tracer studies on nitrogen transformations in soil with special attention to mineralization-immobilization relationships. *Kungl. Lantbrukshögsk. Ann.*, **24**, 101-361.

JENSEN, H. L. (1952). Om staldysdningens mikrobiologiske søndereling. I. Det organiske gødningskvælstofs nitrifikation. *Tidsskr. Planteavl.*, **55**, 237-264.

JOLIVET, M. E., et HÉLIAS, M. (1953). Considérations sur la minéralisation à l'étuve, *in vitro,* de l'azote organique des sols bretons. *C. R. Acad. Agric. France,* **3**, 508-510.

JURDANT, M. (1962). Carte phytosociologique et forestière de la forêt expérimentale de Montmorency. Ministère des Forêts, Division des recherches sylvicoles. *En préparation.*

KAILA, A., KOYLYÄRVI, J., et KIVINEN, E. (1953). Influence of temperature upon the mobilization of nitrogen in peat. *Maat. Aikak.*, **25**, 37-46.

KAILA, A., SOINI, S., et KIVINEN, E. (1954). Influence of lime and fertilizers upon the mineralization of peat nitrogen in incubation experiments. *Maat. Aikak.*, **26**, 79-95.

KRESGE, C. B., et MERKLE, F. G. (1957). A study of the validity of laboratory techniques in appraising the available nitrogen producing capacity of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **21**, 516-521.

LAFOND, A. (1958). Some soils, vegetation and site relationships of the climatic and sub-climatic black spruce forest in North-eastern America. *First North Am. For. Soils Conference* (East Lansing), 67-74.

LINTEAU, A. (1955). Forest site classification of the northeastern coniferous section, boreal forest region, Québec. Canada, Dept. Northern Affairs and National Resources *Bull. n° 118.*

LOSSAINT, P. (1961). Étude *in vitro* de l'influence des litières forestières sur la minéralisation de l'azote organique dans un Mull acide. *C. R. Acad. Sci. Paris,* t. 253, 2245-2247.

LOVE, C. W., et BROWN, B. R. (1959). Substances in leaves affecting the decomposition of litter. *Report on Forest Research for the year ended March 1959.* Her Maj. Sta. Off., London, p. 104-109.

LUNT, H. A. (1931). The carbon-organic matter factor in the forest soil humus. *Soil Sci.*, **32**, 27-33.

MA, T. S., et ZUAZAGA, G. (1942). Micro-Kjeldahl determination of nitrogen. A new indicator and an improved rapid method. *Anal. Chem.*, **14**, 280-282.

MIKOLA, P. (1955). Experiments on the rate of decomposition of forest litter. *Commun. Inst. Forest Fenniæ*, **43**, 1-50.

OWEN, O., WINSOR, G. W., et LONG, M. I. E. (1950). Effect of carbon nitrogen ratio upon the formation of nitrate and ammonia from the amino-acids in soils. *Nature*, **166**, 152.

PARKER, D. T., LARSON, W. E., et BARTHOLOMEW, W. V. (1957). Studies on nitrogen tie-up as influenced by location of plant residues in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **21**, 608-612.

PEEVY, W. J., et NORMAN, A. G. (1948). Influence of composition of plant materials on properties of the decomposed residues. *Soil Sci.*, **65**, 209-226.

RUBINS, E. J., et BEAR, F. E. (1942). C/N ratios in organic materials in relation to the availability of their nitrogen. *Soil Sci.*, **54**, 411-423.

SABEY, B. R., BARTHOLOMEW, W. V., SHAW, R., et PESEK, J. (1956). Influence of temperature on nitrification in soils. *Soil Sci. Am. Proc.*, **20**, 357-360.

SCHREVEN, D. A. (1958). Onderzœkingen en ervaringen inzake de stikstofbemesting in the Ijsselmeerpolders. III. Proefnemingen in verband met stikstof-mineralisatie in grond. *Van Zee tot Land*, **26**, 26-52.

STEVENSON, F. J. (1960). Chemical nature of nitrogen in the fulvic fraction of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **24**, 472-476.

TYLER, K. B., BROADBENT, F. E., et HILL, G. N. (1959). Low-temperature effects on nitrification in four California soils. *Soil Sci.*, **87**, 123-129.

VIZIR, A. P. (1956). The influence of litter of various tree species on the intensity of ammonification in forest soils. *Dojov. Akad. Nauk Ukrain. RS R*, **2**, 181-184.

WEETMAN, G. F. (1962). Nitrogen relations in black spruce (*Picea mariana* Mill.) stand subject to various fertilizer and soil treatments. Pulp and Paper Res. Inst. Canada, Woodland Res. Index No. 129, 112 p.

ZÖTTL, H. (1958). Die Bestimmung der Stickstoffmineralisation im Waldhumus durch den Brutversuch. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenkunde*, **81**, 35-50.

ZÖTTL, H. (1960*a*). Die Mineralstickstoffanlieferung in Fichten- und Kiefernbeständen Bayerns. *Forstwiss. Centr.*, **79**, 221-236.

ZÖTTL, H. (1960*b*). Dynamik der Stickstoffmineralisation im organischen Waldbodenmaterial. III. pH – Wert und Mineralstickstoff – Nachlieferung. *Plant and Soil*, **13**, 207-223.

APPENDICE

Relevés de végétation dans les érablières d'où originent les humus du type Moder et Mull utilisés dans ce travail (voir tableau 2).

1. Érablière A

Endroit : Saint-Achille de Montmorency
Date : 24/9/60
Altitude : 1,050 pieds
Pente : 15°
Exposition : est

Âge du peuplement : 50 ans
Sol : brun acide
Humus : Moder mulloïde
Régime hydrique : frais (mésophytique)
Roche-mère : dépôts morainiques

Strate arborescente : recouvrement 70%, hauteur : 50 pieds

4.4* *Acer saccharum*
1.1 *Betula lutea*
1.1 *Fagus grandifolia*

Strate arbustive : recouvrement 20%, hauteur : 10 pieds

1.1 *Acer saccharum*
+.1 *Betula lutea*
+.1 *Fagus grandifolia*

Strate herbacée : recouvrement 90%, hauteur : 1 pied

4.4 *Acer saccharum*
+.2 *Betula lutea*
+.2 *Fagus grandifolia*
2.2 *Polystichum acrostichoides*
2.2 *Dryopteris spinulosa*
1.3 *Taxus canadensis*
1.2 *Arisæma atrorubens*
1.2 *Trillium erectum*
1.2 *Tiarella cordifolia*
1.2 *Cornus alternifolia*
1.2 *Lonicera canadensis*
1.2 *Sambucus pubens*
1.2 *Viola sp.*
1.2 *Dryopteris noveboracensis*
1.2 *Dryopteris phegopteris*
1.2 *Viburnum lantanoides*
1.2 *Lycopodium lucidulum*
1.1 *Actæa rubra*
1.1 *Polygonatum pubescens*
1.1 *Athyrium Filix-femina* var. *Michauxii*
1.1 *Streptopus roseus*
1.1 *Corylus cornuta*
+.2 *Dryopteris disjuncta*
+.2 *Gallium triflorum*
+.2 *Smilacina racemosa*
+.2 *Oxalis montana*

2. Érablière B

Endroit : Saint-Achille de Montmorency
Date : 24/9/60
Altitude : 900 pieds
Pente : 5°
Exposition : sud

Âge du peuplement : 70 ans
Sol : brun podzolique
Humus : Moder type
Régime hydrique : frais
Roche-mère : dépôts morainiques

* Abondance-dominance et sociabilité (Braun – Blanquet, 1928).

Strate arborescente : recouvrement 70%, hauteur : 50 pieds.

3.3	*Acer saccharum*	1.1	*Betula lutea*
3.3	*Fagus grandifolia*	+.1	*Abies balsamea*

Strate arbustive : recouvrement 20%, hauteur : 10 pieds.

1.1	*Acer saccharum*	+.1	*Betula lutea*
1.1	*Fagus grandifolia*	+	*Acer pennsylvanicum*

Strate herbacée : recouvrement 70%, hauteur : 1 pied.

2.2	*Acer saccharum*	+.3	*Maianthemum canadense*
1.1	*Fagus grandifolia*	+.3	*Dryopteris disjuncta*
2.2	*Viburnum lantanoides*	+.3	*Dryopteris phegopteris*
+	*Acer spicatum*	+.2	*Sambucus pubens*
+	*Acer pennsylvanicum*	+.2	*Polygonatum pubescens*
3.3	*Taxus canadensis*	+.2	*Aralia nudicaulis*
1.2	*Lycopodium lucidulum*	+.2	*Clintonia borealis*
1.2	*Cornus alternifolia*	+.2	*Monotropa uniflora*
1.2	*Viola sp.*	+.2	*Corylus cornuta*
1.1	*Streptopus roseus*	+.2	*Carex sp.*
1.1	*Dryopteris spinulosa*	+.2	Graminée sp.
1.1	*Trillium erectum*	+	*Lonicera canadensis*
1.1	*Medeola virginiana*	+	*Trillium undulatum*
1.1	*Oxalis montana*	+	*Trientalis borealis*

3. *Érablière C*

Endroit : Tewkesbury	Âge du peuplement : 150 ans
Date : 3/10/60	Sol : brun forestier
Altitude : 950 pieds	Humus : Mull acide
Pente : 30°	Régime hydrique : frais
Exposition : est	Roche-mère : dépôts morainiques

Strate arborescente : recouvrement 40%, hauteur : 70 pieds.

3.3	*Betula lutea*	+	*Abies balsamea*
1.1	*Acer saccharum*	+	*Picea rubens*
+	*Fagus grandifolia*		

Strate arbustive : recouvrement 70%, hauteur : 8 pieds.

2.2	*Betula lutea*	+	*Abies balsamea*
2.2	*Acer saccharum*	+	*Picea rubens*
+.1	*Acer spicatum*		

Strate herbacée : recouvrement 70%, hauteur : 1 pied.

1.1	*Acer saccharum*	+.2	*Lycopodium lucidulum*
+.1	*Betula lutea*	+.2	*Viburnum lantanoides*
+.1	*Acer spicatum*	+.2	*Smilacina racemosa*
+	*Abies balsamea*	+.2	*Streptopus roseus*
+	*Picea rubens*	+.2	*Cornus alternifolia*

+	*Acer pennsylvanicum*	+.1	*Viola sp.*
+	*Corylus cornuta*	+.1	*Dryopteris disjuncta*
3.3	*Tiarella cordifolia*	+.1	*Dryopteris spinulosa*
1.1	*Oxalis montana*	+.1	*Sambucus pubens*
+.2	*Lonicera canadensis*	+	*Clintonia borealis*
+.2	*Dryopteris noveboracensis*	+	*Aralia nudicaulis*
+.2	*Polygonatum pubescens*	+	*Trillium erectum*
		+	*Aster sp.*

4. *Érablière D*

Endroit : Sainte-Foy
Date : 23/5/61
Altitude : 300 pieds
Pente : nulle

Âge du peuplement : 70 ans
Sol : brun forestier
Humus : Mull acide
Régime hydrique : frais
Roche-mère : dépôts morainiques

Strate arborescente : recouvrement 80%, hauteur : 60 pieds.

3.3	*Acer saccharum*	(+)	*Betula lutea*
2.2	*Fraxinus americana*	(+)	*Fagus grandifolia*
+.1	*Tilia americana*	(+)	*Picea glauca*

Strate arbustive : recouvrement 50%, hauteur : 12 pieds.

2.2	*Acer saccharum*	+.1	*Acer spicatum*
1.2	*Prunus virginiana*	+.1	*Corylus cornuta*
1.1	*Fraxinus americana*	+	*Viburnum lantanoides*
1.1	*Sambucus pubens*	(+.2)	*Quercus rubra* var. *borealis*
+.2	*Amelanchier sp.*	(+)	*Abies balsamea*
+.2	*Cratægus sp.*	(+)	*Tilia americana*

Strate herbacée : recouvrement 30%, hauteur : 1 pied.

3.3	*Acer saccharum*	+.1	*Actæa rubra*
1.2	*Erythronium americanum*	+.1	*Arisæma atrorubens*
1.2	*Prenanthes trifoliolata*	+.1	*Aster acuminatus*
1.2	*Trillium erectum*	+.1	*Fraxinus americana*
1.1	*Lonicera canadensis*	+.1	*Solidago sp.*
1.1	*Polygonatum pubescens*	+	*Ribes sp.*
1.1	*Smilacina racemosa*	(+.2)	*Maianthemum canadense*
1.1	*Streptopus roseus*	(+)	*Sorbus americana*
+.2	*Athyrium Filix-femina* var. *Michauxii*		

LISTE DES PUBLICATIONS

CONTRIBUTIONS

N° 1 — LAFOND, ANDRÉ. Les déficiences en potassium et magnésium de quelques plantations de *Pinus strobus*, *Pinus resinosa* et *Picea glauca* dans la province de Québec. 1958.

N° 2 — CHOUINARD, L., et L. PARROT. The callusing and rooting of air-layers in *Betula papyrifera*, *Populus tremuloides*, *Larix laricina* and *Abies balsamea*. 1958.

N° 3 — AMIOT, L.-P. Inflammabilité et pouvoir thermique de la matière organique de certains types forestiers. 1959.

N° 4 — CHOUINARD, L. I. — Structure et fonctionnement de l'apex caulinaire de *Pinus banksiana* Lamb., au cours de la germination. II. — Sur l'existence d'un centre quiescent au niveau de l'apex radiculaire juvénile de *Pinus banksiana* Lamb. 1959.

N° 5 — BERNIER, BERNARD. Observations sur le métabolisme respiratoire de quelques humus forestiers. 1960.

N° 6 — RISI, J., and E. ZELLER. Specific gravity of the wood of Black Spruce (*Picea mariana*), grown on a Hylocomium-Cornus site-type. 1960.

N° 7 — GRANDTNER, M. M. La forêt de Beauséjour, comté de Lévis, Québec. Étude phytosociologique. 1960.

N° 8 — LUSSIER, L.-J. Planning and Control of Logging Operations. 1961.

BULLETINS

N° 1 — MAHEUX, GEORGES. Le saumon de l'Atlantique dans l'économie de la province de Québec. 1956. (Épuisé). Traduction anglaise publiée par The Atlantic Salmon Association. 1956.

N° 2 — DUCHAUFOUR, PHILIPPE. La dynamique du sol forestier en climat atlantique. 1959. Dynamics of forest soils under the Atlantic climate (miméo). 1959.

N° 3 — LUSSIER, OMER, et G. MAHEUX. Les forêts du sud des États-Unis et leur influence sur l'industrie forestière du Québec. (Épuisé). Traduction anglaise publiée par The Quebec Forest Industries Association. 1959.

N° 4 — LADOUCEUR, G., et M. M. GRANDTNER. Les terres à reboiser du Québec méridional. 1961.

N° 5 — La fertilisation forestière au Canada (*Colloque*) — Forest Fertilization in Canada (*Symposium*). 1962.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction 3

Matériel et méthodes expérimentales 4

Résultats et discussion 10

Conclusion 37

Résumé 38

Summary 39

Remerciements 39

Bibliographie 40

Appendice 43